

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Aplikace nových metod v diagnostice
elektrických zařízení**
*Application of a New Methods for Diagnostic
of Electric Power Devices*

2013

Bc. Martin Hečko

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Hečko**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Aplikace nových metod v diagnostice elektrických zařízení**
Application of a New Methods for Diagnostic of Electric Power Devices

Zásady pro vypracování:

1. Popis izolačního stavu VN a NN elektrických strojů
2. Popis současných metod používaných v elektrodiagnostice elektrických strojů
3. Nové trendy v diagnostice izolačních systémů
4. Srovnání a aplikace stávajících a nových diagnostických metod izolačních systémů elektrických strojů

Seznam doporučené odborné literatury:


1. KOLCUNOVÁ I.: Diagnostika elektroenergetických zařízení metodou číastkových výbojov 1. vyd. Košice: Technická univerzita v Košiciách, 2008. 178 s. ISBN 978-80-553-0031-3.
2. MENTLÍK V. a kol.: Diagnostika elektrických zařízení 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 440s. ISBN 978-80-7300-232-9.
3. HUDECZEK M.: Zvyšování spolehlivosti asynchronních strojů včetně poháněných strojů 1. vyd. Albrechtice: Hudeczek Service, 2011. ISBN 978-80-905032-0-5.
4. ZÁLIŠ K.: Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů 1. vyd. Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1358-X.
5. HREIDL M. a kol.: Diagnostické systémy 1. vyd. Praha: ČVUT, 2001. 353 s. ISBN 80-01-02349-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl velice poděkovat svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Stanislavu Mišákovi, Ph.D., za velmi cenné rady a připomínky a Ing. Mariánu Uherovi, který mi pomáhal s měřením v praktické části.

V Ostravě dne:

.....

Bc. Martin Hečko

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá určením stavu izolačního systému u asynchronních motorů za pomoci diagnostických metod. Teoretická část je zaměřena na rozbor izolačního systému asynchronního stroje a na technickou diagnostiku, dále jsou uvedeny jednotlivé diagnostické metody, které jsou schopny určit stav izolačního systému. V praktické části jsou vybrané diagnostické metody uplatněny v praxi a aplikovány na měřené objekty. Výsledky z těchto měření jsou dále zpracovány a jsou z nich vyvozeny závěry. Závěr práce obsahuje celkové zhodnocení naměřených hodnot a posouzení stavu jednotlivých zařízení.

Klíčová slova:

Asynchronní stroj, elektromotor, izolační systém, proudové spektrum, rázová vlna, technická diagnostika, vibrace, zdánlivý izolační odpor, ztrátový činitel.

Abstract:

This thesis deals with the determination of the state of the insulation system on induction motors using diagnostic methods. The theoretical part is focused on the analysis of the insulation system of induction machines and technical diagnostics and then there are various diagnostic methods, which are able to determine the condition of the insulation system. In the practical part of the selected diagnostic methods applied in practice and applied to the measured objects. The results of these measurements are processed and the conclusions drawn from them. The conclusion provides an overall evaluation of the measured values and the assessment of the status of each device.

Key Words:

Induction machine, electric motor, insulation system, current spectrum, shock wave, technical diagnostics, vibration, apparent insulation resistance, dissipation factor.

Seznam použitých zkratk a symbolů:

NN	nízké napětí	
VN	vysoké napětí	
el.	elektrický	
C	kapacita	(F)
C_v	vazební kapacita	(F)
DAR	koeficient dielektrické absorpce	(-)
DD	test vybíjení dielektrika	(-)
I_C	proud protékající kapacitou	(A)
I_R	proud protékající odporem	(A)
I	proud	(A)
L	lokalizovatelné poruchy	(-)
L_{max}	celkový počet poruch	(-)
L_{rel}	poměr lokalizovaných poruch	(-)
M	moment	(N · m)
P	výkon	(W)
P_D	dielektrické ztráty	(W)
PI_{60}, PI_{600}	polarizační index	(-)
Q_R	počet drážek na rotoru	(-)
R	odpor	(Ω)
R_{iz}	izolační odpor	(Ω)
T	absolutní teplota	(K)
T	perioda	(s)
U, U_-, U_z	přiložené střídavé napětí	(V)
U_N	jmenovité napětí	(V)
$U_{poč}$	počáteční napětí výboje	(V)
W	sálavý tok	(W · cm ⁻²)
W_e	energie emitovaná	(J)
W_r	energie odražená	(J)
W_t	energie prostupující	(J)
Z	impedance	(Ω)
Z_m	měřicí impedance	(Ω)

b	Wienova konstanta	($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)
f	frekvence	(Hz)
f_{drd}	dynamická excentricita	(Hz)
f_{drs}	statická excentricita	(Hz)
f_{dsv}	frekvence drážkování rotoru	(Hz)
f_{dyn}, f_3	frekvence rotorové tyče	(Hz)
f_{max}	maximální frekvence	(Hz)
f_o	otáčková frekvence	(Hz)
f_v	frekvence vadného ustavení	(Hz)
f_1	frekvence statorového pole	(Hz)
f_2	frekvence rotorového pole	(Hz)
i_a	absorbční proud	(A)
i_b	nabíjecí proud	(A)
i_C	kapacitní proud	(A)
i_i	izolační proud	(A)
k, k_e, k_1	činitelé	(-)
n	otáčky	($\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$)
n_s	synchronní otáčky	($\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$)
p	počet pólových dvojic	(-)
s	skluz	(-)
t	čas	(s)
$\text{tg } \delta$	činitel dielektrických ztrát	(-)
$\text{tg } \delta_{20}$	činitel dielektrických ztrát při 20 °C	(-)
δ	ztrátový úhel	(°)
ε	emisivita	(-)
ϑ	teplota při měření	(°C)
ϑ_v	teplota během výchozího měření	(°C)
λ_m	maximální vlnová délka	(μm)
ν	číslo harmonické	(-)
σ	Stephan-Bolzmannova konstanta	($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)
τ	časová konstanta	(s)
φ	fázový posun	(°)
ω	úhlová rychlost	($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

Obsah

Úvod.....	1
1 Popis izolačního stavu elektrických strojů.....	2
1.1 Asynchronní stroj.....	2
1.1.1 Princip funkčnosti asynchronního motoru.....	2
1.1.2 Části asynchronního stroje.....	3
1.2 Izolační systém	4
1.2.1 Izolační materiály	4
1.2.2 Izolace vinutí.....	5
2 Technická diagnostika	10
2.1 Diagnostické části	10
2.1.1 Diagnóza, prognóza, geneze	10
2.1.2 Diagnostické prostředky	11
2.1.3 Diagnostický systém.....	11
2.1.4 Diagnostická veličina.....	13
2.1.5 Funkčnost, porucha, schopnost provozu.....	13
2.2 Diagnostické metody	14
2.2.1 Měření zdánlivého izolačního odporu	15
2.2.2 Zkouška rázovou vlnou.....	16
2.2.3 Měření vibrací.....	16
2.2.4 Analýza statorových proudů	17
2.2.5 Analýza hlukových emisí.....	17
2.2.6 Měření teploty pomocí termografie	18
3 Vývojové trendy v diagnostice	21
3.1 Měření ztrátového činitele	22
3.2 Měření částečných výbojů	26
3.2.1 Akustická detekce	26
3.2.1 Galvanická metoda měření částečných výbojů.....	27
4 Aplikace vybraných diagnostických metod.....	28
4.1 Měřené objekty	28
4.2 Zdánlivý izolační odpor.....	30
4.3 Zkouška rázovou vlnou.....	32

4.4 Ztrátový činitel.....	35
4.5 Statorový proud.....	36
4.6 Vibrace.....	38
5 Zhodnocení měření	42
Závěr	45
Literatura.....	47
Seznam příloh	49

Úvod

Izolační systém patří mezi nejdůležitější části elektrického stroje. Slouží k oddělení vodivých částí stroje od těch, které neslouží k přenosu energie i jednotlivých vodivých částí mezi sebou. Vlastnosti izolačního systému ovlivňují spolehlivost i bezpečnost daného zařízení, také kvalita izolačního systému a jeho konstrukční řešení rozhoduje o vlastnostech stroje.

Izolační systém elektrického stroje může být složen z mnoha různých elektroizolačních materiálů, podle toho jakých vlastností má zařízení dosáhnout. Izolační materiály se neustále vyvíjí. V současnosti se vývoj zaměřuje na vytvoření co nejoptimálnějšího systému, který bude splňovat stále rostoucí požadavky na něj kladené, např. větší teplotní odolnost, vyšší dielektrická pevnost atd.

Izolační systém je vystaven celé řadě degradačních faktorů způsobujících zhoršení izolačních vlastností, což může následně způsobit závady a poruchy. Izolační systém jako takový musí splňovat celou řadu náročných kritérií, které se odvíjí od provozních stavů zařízení, působení okolního prostředí (teplota, vlhkost, tlak) a dalších faktorů.

Je vhodné zjišťovat, v jakém stavu se daný izolační systém nachází a tím předejít případné poruše nebo úplnému zničení zařízení. Pro jeho posouzení se využívá technické diagnostiky, konkrétně oblasti metod, které jsou určeny k měření izolačního systému. V současnosti existují vhodné diagnostické metody, které dokážou rychleji i přesněji odhalit závadu v izolačním systému. Tím napomáhají k včasné intervenci a jejímu případnému odstranění.

V rámci diplomové práce byla řešena problematika schopnosti vybraných diagnostických metod vypovědět stav daného zařízení, odhalit případnou poruchu. Následně byly porovnány výsledky jednotlivých metod aplikovaných na daných zařízeních a zhodnoceno, zda zjištěné údaje odpovídaly stavu zařízení.

1 Popis izolačního stavu elektrických strojů

Izolační systém patří mezi nejdůležitější části elektrického stroje. Slouží k oddělení vodivých částí od magnetického obvodu, ostatních vodivých částí a různých neaktivních částí, které se nemají podílet na přenosu energie. Jeho kvalita a stav velmi ovlivňují spolehlivost i bezpečnost provozu daného zařízení.

K posuzování stavu izolačního systému stroje byl vybrán asynchronní motor. Asynchronní motory díky své jednoduché konstrukci a skoro bezúdržbovému provozu je nejrozšířenější v oblasti elektrických pohonů. V průmyslu jsou nejpoužívanější.

1.1 Asynchronní stroj

Asynchronní stroj vynalezl Nikola Tesla v roce 1888. Je to točivý elektrický stroj, pracující na střídavý proud.

Asynchronní stroj slouží k transformaci elektrické energie na mechanickou energii (motor) nebo naopak (generátor). Jeho provozní stavy jsou motor, generátor a protiproudá brzda. Asynchronní stroje jsou různých výkonů od pár wattů do výkonů megawattů. Jejich využití je díky jednoduché konstrukci značné, především v průmyslu tento typ stroje převládá.

1.1.1 Princip funkčnosti asynchronního motoru

Statorové vinutí, zpravidla třífázové, je připojeno na síťové napětí, také třífázové. Vinutím statoru začne protékat střídavý proud, který vyvolá ve vzduchové mezeře točivé magnetické pole, které se otáčí synchronními otáčkami n_s . Siločáry magnetického pole protínají statorové i rotorové vinutí a indukují v nich napětí.

Indukované napětí ve statoru působí proti napětí sítě a tím omezí proud protékající vinutím. Napětí naindukované v rotoru v něm vyvolá proud. V okolí rotorového vinutí se nachází magnetické pole. Tyto okolnosti způsobí, že na vodič začne působit mechanická síla a podle Lenzova zákona se vodiče rotoru začnou vychylovat ve směru působení magnetického pole.

Rotor se roztočí a snaží se snížit rozdíl otáček statorového a rotorového pole a tím potlačit množství indukovaného napětí v rotoru, tímto se omezí i proud rotorem protékající. Stroj se roztočí až na otáčky blízké synchronním otáčkám. Rozdíl mezi otáčkami statoru a rotoru je svázán přes skluz s .

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (-) \quad (1.1)$$

Synchronních otáček motor nikdy nedosáhne, protože by nebyl relativní pohyb mezi vodiči rotoru a statoru, tím by se v rotoru neindukovalo žádné napětí. To by způsobilo, že by motor měl nulový moment.

Z tohoto důvodu se motor nazývá asynchronní nebo také indukční, jelikož jeho funkčnost je založena na indukování napětí v rotoru. [4]

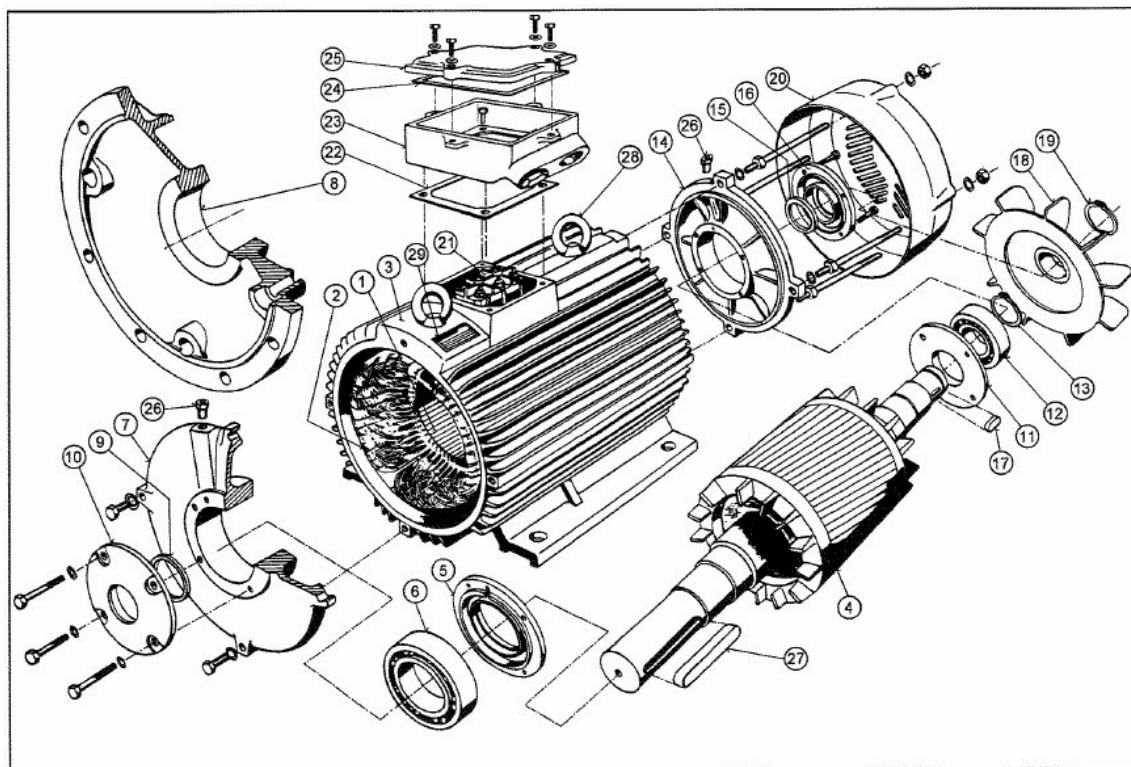
1.1.2 Části asynchronního stroje

Asynchronní stroj je složen ze dvou základních částí, ze statoru a rotoru.

Statorové těleso je složeno z plechů pro elektrotechniku a ty jsou uloženy v kostře stroje. Statorové plechy mají po vnitřním obvodu drážky, v kterých je uloženo vinutí.

Rotorové těleso je složeno z hřídele, na kterou jsou uchyceny rotorové plechy. Tyto plechy mají po vnější straně drážky, v kterých je rotorové vinutí. To je dvojího typu:

- s vinutým rotorem – na rotoru je navinuto obvykle trojfázové vinutí, které je vyvedeno na tři kroužky, na něž dosedají kartáče. Vřazováním odporů do obvodu rotoru lze měnit momentovou charakteristiku a tím docílit plynulého rozběhu motoru.
- s kotvou nakrátko – klec je odlita z hliníku nebo složena z měděných tyčí a na čelech svařené se zkratovací kruhy, taktéž z mědi.



Obr. 1.1 – Části asynchronního motoru s kotvou nakrátko [5]

1.2 Izolační systém

Spolehlivost elektrického točivého stroje je přibližně stejně ovlivněna elektrickou, tak i mechanickou částí. V elektrické části stroje dochází ke ztrátě spolehlivosti především v izolačním systému vinutí a to vede ke ztrátě elektrické pevnosti stroje.

Kvalita izolačního systému popř. jeho konstrukční řešení rozhoduje o vlastnostech stroje jako je výkon stroje a jeho spolehlivost. Izolační systém elektrického stroje je složen z různých elektroizolačních materiálů. Výsledná kvalita celkové izolace je dána vhodným výběrem elektroizolačních materiálů pro jednotlivé části stroje. [6]

1.2.1 Izolační materiály

Izolační materiály se používají při výrobě elektrických strojů k izolaci částí elektrických strojů, nacházejících se na různém elektrickém potenciálu. Tyto materiály mohou být plynné, kapalně nebo pevné. V elektrických strojích se nejčastěji používají pevné izolační materiály. Izolace bývá zpravidla vrstvená, to znamená, že je složená z více druhů izolačních materiálů.

Tloušťka izolace mezi elektrotechnickými plechy, síla drážkové a závitové izolace, do značné míry určuje rozměry stroje. Tepelná stálost a tepelná vodivost izolace určují dovolené teploty, resp. dovolená oteplení částí stroje. Izolace musí mít potřebné mechanické vlastnosti, aby umožňovala mechanizaci a automatizaci technologických procesů při výrobě.

Při oteplení izolace nad určitou mez dochází ke zvýšenému stárnutí izolace. Tím dochází ke zhoršení izolačních vlastností a mechanické pevnosti.

Základem pro klasifikaci izolace je tepelná stálost, tj. schopnost izolačního materiálu plnit své funkce při provozní teplotě po dobu srovnatelnou s uvažovanou dobou nasazení stroje.

Dle normy ČSN 33 0050 se izolační materiály používané při stavbě elektrických strojů, dělí na několik tříd podle dovolených teplot. Tato teplota odpovídá nejteplejšímu místu izolace ve stroji. Zpravidla to bývá v drážkách elektrického stroje, za normálních provozních podmínek.

S materiály dané tepelné třídy je možné současně použít i materiály nižších tříd za podmínky, že celková izolace nebude vystavena takovým teplotním podmínkám, které by ji učinily neschopnou trvalého provozu.

Tab. 1.1 – Tepelné třídy izolace

Třída	Mezní teplota °C	Charakteristika skupin materiálů
Y	90	Vlákninové materiály z celulózy, bavlny a hedvábí nenapuštěné a neponořené do tekutého izolantu a další materiály odpovídající dané třídě a jejich kombinace.
A	105	Vlákninové materiály z celulózy, bavlny a hedvábí napuštěné nebo ponořené do tekutého izolantu a další materiály odpovídající dané třídě a jejich kombinace.
E	120	Některé syntetické organické fólie a další materiály odpovídající dané třídě a jejich kombinace.
B	130	Materiály na bázi slídy (včetně organických podložek), azbestu a skelného vlákna, s organickými pojidly a další materiály odpovídající dané třídě a jejich kombinace.
F	155	Materiály na bázi slídy, azbestu a skelného vlákna se syntetickými pojidly a další materiály odpovídající dané třídě a jejich kombinace.
H	180	Materiály na bázi slídy, azbestu a skelného vlákna se silikonovými pojidly, silikonové elastomery a další materiály odpovídající dané třídě a jejich kombinace.
C	nad 180	Slída, keramické materiály, sklo, křemen, bez pojidel nebo s anorganickými pojidly a další materiály odpovídající dané třídě a jejich kombinace.

Uvedená klasifikace izolačních materiálů je pouze orientační. Vyjmenované materiály jsou zlomkem z celé řady používaných materiálů.

V současné době je u elektrických strojů nejčastěji použita třída izolace F. Stroje odolné proti vlhkosti, pro tropické prostředí, stroje odolné proti chemickým vlivům a proti korozi i jiným vlivům vyžadují ještě kvalitnější izolaci. [7]

1.2.2 Izolace vinutí

Během izolování a zakládání vinutí do drážek stroje je izolace vystavena působení mechanických vlivů a při práci stroje také působení elektrického pole, oteplení, vlhkosti, prachu a podobně. Neexistuje jednotný druh elektroizolačního materiálu, který by zajistil absolutní spolehlivost izolace elektrického stroje při působení všech vlivů.

Izolační materiály s velkým izolačním odporem obvykle nevykazují dostatečnou mechanickou pevnost a nevydrží mechanická namáhání při izolování a ukládání do drážek, mechanicky odolné materiály zase obvykle nemají dostatečnou elektrickou pevnost. Proto se při

konstrukci elektrické izolace používá několik různých materiálů, jejichž vlastnosti se vzájemně doplňují. Mimo elektrickou pevnost musí izolace mít i dostatečnou tepelnou vodivost, aby teplo vznikající ve vodičích při práci elektrického stroje mohlo být odvedeno bez přílišného zvýšení teploty.

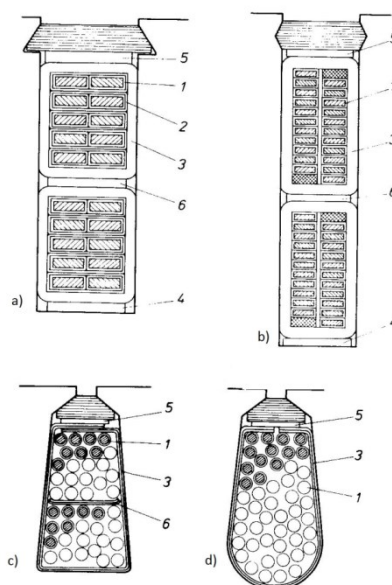
Hlavními požadavky, které jsou kladeny na izolaci elektrického stroje, jsou velká elektrická pevnost a dobrá tepelná vodivost. Ostatní požadavky jako jsou mechanická pevnost, odolnost proti vlhkosti, tepelná stálost, odolnost proti chemickým vlivům, jsou kladeny na izolaci pouze z hlediska její schopnosti zachovat elektrickou pevnost při jejím technologickém zpracování a při dlouhodobé činnosti elektrických strojů při určeném druhu zatížení a při působení okolního prostředí.

Na obr. 1.2 jsou naznačeny řezy různými typy drážek vyplněné vodiči vinutí. Podle své funkce se izolace vinutí dělí na drážkovou a závitovou izolaci vodičů.

Izolace vodičů 1 - je izolace, již je opatřen vodič, ze kterého se vinutí vyrábí.

Izolace závitová 2 - bývá pouze ve strojích s vinutím vyrobeným z pásu. Obvykle se vyskytuje pouze ve strojích na vysoké napětí starší konstrukce. Pro současná vinutí se používají izolované vodiče, které nevyžadují dodatečnou závitovou izolaci.

Drážková izolace 3 - se umísťuje buď přímo na cívky vinutí, nebo se zakládá do drážek stroje před uložením vinutí.



Obr. 1.2 – Příklady řezů drážek a) otevřená drážka s tuhými cívkami, b) otevřená drážka s tyčovým vinutím velkých strojů, c) drážka se vsypávaným dvouvrstvým vinutím, d) drážka se vsypávaným jednovrstvým vinutím [7]

Do drážek elektrických strojů se umísťuje několik typů vložek, obvykle z vrstveného materiálu, které mají různé funkce. Podložky 4 na dno drážek (obr. 1.2 a,b) mají chránit drážkovou izolaci před mechanickým poškozením, ke kterému by mohlo dojít při zaklínování vlivem nerovností dna drážky. Podložky pod klín 5 (obr. 1.2) mají chránit vinutí před poškozením při zakládání drážkových klínů a mimoto se volbou různého počtu podložek s různými tloušťkami doplňuje vůle vinutí na výšku drážky, aby cívky byly v drážkách dostatečně upevněny.

Vložky 6 mezi vrstvami vsypávaných a dělených vinutí (obr. 1.2 c) tvoří izolační mezivrstvu mezi vodiči horní a dolní vrstvy. U vinutí s tuhými cívkami mají vložky mezi vrstvami (obr. 1.2 a,b) zajistit danou konstantní vzdálenost na výšku mezi aktivními stranami cívek horní a dolní vrstvy. Tím kompenzují zesílení izolace v čelech a zamezují se vzájemnému dotyku cívek patřících k různým fázím při jejich křížení na čele vinutí. Vynecháním této vložky vznikne prostor pro založení teploměru, nutného zvláště u strojů velkého výkonu, pro měření teploty vinutí za provozu.

Izolace cívek na vysoké napětí může být provedena buď jako kombinovaná, nebo průběžná.

Kombinovaná izolace má v drážce vyšší elektrickou pevnost ve srovnání s izolací průběžnou. Jejím hlavním nedostatkem je menší elektrická pevnost v místě styku dvou typů izolací. Toto místo se nachází ve velké blízkosti výstupu rovné části cívky z drážky, tj. v místě největší intenzity elektrického pole. Toto místo styku je navíc vystaveno největším deformacím, jak při ukládání do drážek, tak při práci stroje, neboť tuhost čel cívek je mnohem menší než tuhost drážkové části uložené ve vytvrzené izolační trubce. Proto se zvětšuje nebezpečí průrazu právě v místě styku obou typů izolací. Nedostatkem kombinované izolace je také malá kompaktnost izolace čel, což zhoršuje odolnost proti vlhkosti.

Průběžná izolace je vytvořena navíjením několika vrstev izolační pásky průběžně po celé délce cívky. Takto izolovaná cívka se potom napouští nebo impregnuje. Z hlediska elektrické pevnosti je průběžná izolace téměř ekvivalentní izolaci kombinované, je však spolehlivější, protože nemá nehomogenní místo styku izolace drážkové a izolace čel, je odolnější proti působení koróny a proti vlhkosti.

Dnes se jako hlavní izolační materiály používají materiály na bázi slídy a pro impregnaci epoxidové pryskyřice. Epoxidové impregnační laky a pryskyřice jsou na rozdíl od dříve používaných vytvrzovatelné a cívky vinutí si udržují svoji tuhost a mechanickou pevnost nezávisle na opětném ohřevu.

Aby byla zaručena možnost mírné deformace cívek při jejich zakládání do drážek, izolují se čela cívek páskou, která tuto manipulaci umožňuje. Používají se metody, kdy dochází k impregnaci až po navinutí stroje. Vinutí se impregnuje tak, že se celý navinutý svazek namáčí do impregnačního laku za tepla. Namáčení je obvykle doplněno vakuovým nebo tlakově-vakuovým cyklem ve zvláštních impregnačních nádobách.

Dobrá homogenita izolace, lepší elektrické vlastnosti epoxidových impregnačních laků a mechanická pevnost cívek dovolují zmenšit tloušťku drážkové izolace, a tím zlepšit využití drážky.

U strojů na vysoké napětí se používá závitová izolace z páskového materiálu, který se navíjí po celé délce každého závitu cívky na izolaci vodičů. Jestliže se vodič skládá z několika dílčích, je závitovou izolací izolován celý svazek těchto dílčích vodičů. Vyrábějí se i vodiče se zesílenou izolací, u nichž doplňková závitová izolace není nutná. Značně se tak snižuje pracnost při výrobě cívek a zvyšuje se spolehlivost izolace.

Tyčová vinutí statoru strojů na vysoké napětí se izolují obvykle tak, že drážková izolace je většinou průběžná, impregnovaná epoxidovými pryskyřicemi a má všechny vynikající vlastnosti průběžné impregnované cívkové izolace vinutí strojů na vysoké napětí.

Neobvyklostí konstrukce izolace tyčových vinutí střídavých strojů na vysoké napětí je, že odpadá zvláštní závitová izolace, neboť v drážce jsou umístěny pouze dva vodiče a mezi nimi jsou dvě vrstvy cívkové, resp. drážkové izolace tyčí. To značně zvyšuje spolehlivost tyčových vinutí ve srovnání s vinutími cívkovými.

Ve strojích na nízké napětí se zesílenou izolací se používají tuhé cívky s kombinovanou nažehlovanou anebo plynulou izolací, analogií k izolaci vinutí na vysoké napětí, jenom tloušťka je menší. Takové vinutí se ukládá do otevřených drážek (obr. 1.2 a). V případě nutnosti se jako závitová izolace v takovýchto vinutích používají vložky mezi závity v drážkové i čelní části vinutí. Tloušťka a materiál těchto vložek závisejí na teplotní třídě drážkové izolace. Drážková izolace se provádí z několika vrstev izolační fólie jako vyložení drážky. Takováto konstrukce izolace je sice méně spolehlivá, ve srovnání s nažehlovanou nebo plynulou izolací cívek ukládaných do otevřených drážek, ale často se používá, protože stroje, jejichž statory mají polozavřené drážky, jsou úspornější. Čela takového vinutí se izolují páskami.

V čelech se zakládají vložky mezi několik prvních závitů každé půlcívky, protože tyto závity jsou nejvíce namáhány při navíjení, což může vést ke snížení pevnosti izolace vodičů nebo k jejímu poškození.

Po vytvarování se závity dílčích cívek zajistí proti rozsypání lakem a ovinutím páskou, která musí odpovídat teplotní třídě izolace.

Když srovnáme stroje různých výkonů, zjistíme, že tloušťka izolace se u různých strojů liší, i při jmenovitém napětí. Toto je způsobeno většími požadavky na mechanickou pevnost izolace u větších strojů

Ve vsypávaných vinutích se doplňková závitová izolace v drážkové ani čelní části nedává, protože závity nemají při navíjení cívek určité místo v drážce a elektrická pevnost izolace vodičů pro stroje malých rozměrů plně postačuje k tomu, aby snesla napětí mezi závity jedné cívky. U dvouvrstvých vsypávaných vinutí se nutně vkládají izolační vložky oddělující obě vrstvy vinutí, strany různých cívek v jedné drážce (obr. 1.2 d). Tyto vložky musí mít stejnou elektrickou pevnost jako drážková izolace, neboť při zkrácení kroku se v některých drážkách nacházejí strany cívek,

patřících k různým fázím. Doplňková izolace v čelních částech vsypávaných vinutí se dává pouze mezi cívky různých fází, tj. mezi krajní cívky různých cívkových skupin. Ve většině případů je tato izolace z izolačních fólií téže tepelné třídy jako izolace drážková. Spolehlivější je však izolace čel krajních cívek páskami, které se používají u strojů větších výkonů. [7]

2 Technická diagnostika

Technická diagnostika se zabývá metodami a prostředky zjišťování technického aktuálního stavu objektu. Technickou diagnostikou se většinou rozumí diagnostika bezdemontážní a nedestruktivní.

Diagnostika a diagnóza jsou odvozená slova z „dia-gnosis“, což v řeckém jazyku znamená „skrze poznání“.

2.1 Diagnostické části

2.1.1 Diagnóza, prognóza, geneze

Diagnostika analyzuje okamžitý stav elektrického zařízení a vyhodnocuje provozuschopnost zařízení za určitých podmínek. Základním úkolem diagnózy je:

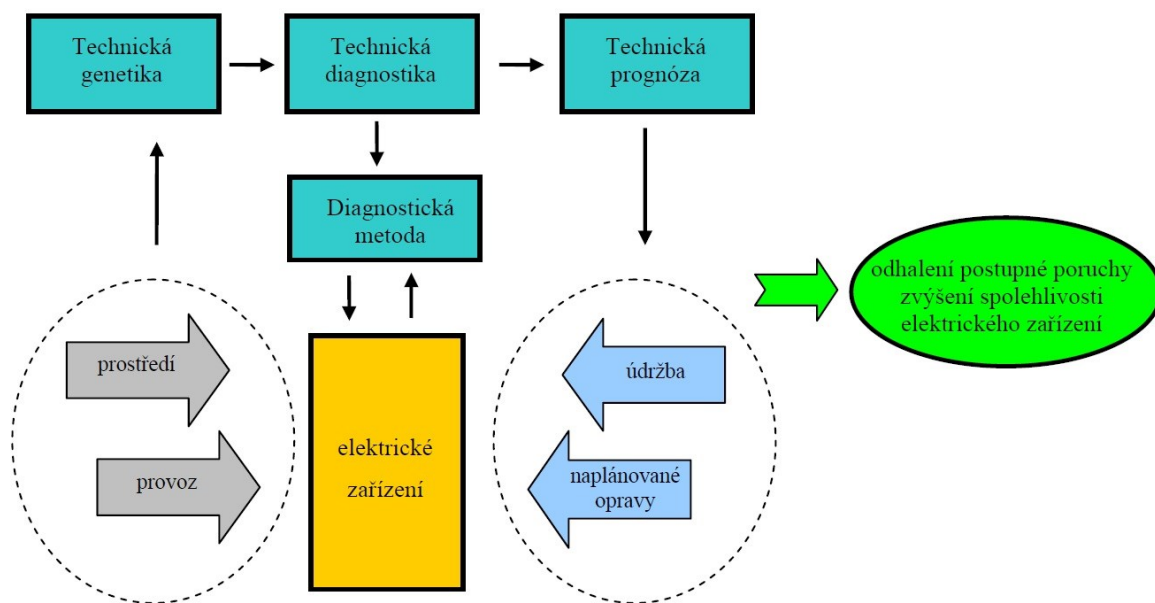
- a) detekce poruchy (tj. identifikace úplné nebo částečné poruchy zařízení),
- b) lokalizace poruchy (tj. určení místa poruchy v zařízení).

S tímto souvisí tzv. diagnostické rozlišení, které udává počet detekovaných, lokalizovaných poruch, dané diagnostickým algoritmem. Zpravidla se pro vyjádření diagnostického rozlišení používá relativní vyjádření L_{rel} tj. poměr detekovatelných, lokalizovatelných poruch L k celkovému počtu možných, na objektu definovaných poruch L_{max} .

$$L_{rel} = \frac{L}{L_{max}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2.1)$$

Prognóza je předpověď vývoje technického stavu do budoucnosti. Cílem prognózy je vymezit na základě statistických vyhodnocení pravděpodobnost bezporuchového stavu v následujícím období nebo na základě postupných poruch určení termínů dílčích a generálních oprav nebo výměny určité části zařízení.

Geneze je analýza příčin poruchy nebo předčasného zhoršení technického stavu zařízení. [2]



Obr. 2.1 – Technická diagnostika [17]

2.1.2 Diagnostické prostředky

Diagnostické prostředky tvoří souhrn technických zařízení (např. testery, senzorové systémy) a pracovních postupů pro analýzu a vyhodnocení stavu diagnostikovaného objektu. Pracovní postupy tvoří sled elementárních úkonů diagnostikování, včetně programového vybavení pro generování a vyhodnocování testů, výběru metody diagnostických veličin, sestavení matematických modelů.

Diagnostické prostředky mohou být realizovány buď jako součást objektu nebo samostatně. Současná tendence je zabudovávat diagnostické prostředky přímo do objektu, což vždy není možné. Proto se pro snímání diagnostických veličin stále častěji používají zabudované integrované obvody se senzory. Vnější prostředky jsou vhodné univerzální měřicí systémy využívané jak pro diagnostiku, tak pro provozní měření. Do této skupiny patří např. logické, příznakové a frekvenční analyzátory, digitální osciloskopy, digitální záznamníky, měřicí systémy na bázi výpočetní techniky. [2]

2.1.3 Diagnostický systém

Diagnostický systém je tvořený diagnostickými prostředky, diagnostikovaným objektem a obsluhou. Základní rozdělení diagnostických systémů je na systémy ON-LINE a OFF-LINE.

Diagnostický systém ON-LINE vyhodnocuje technický stav objektu při jeho provozu. Tento systém je také označován jako provozní diagnostický systém.

Systém ON-LINE je trvale připojený k diagnostikovanému objektu. Monitorování stavu objektu je tedy kontinuální s plynulým vyhodnocováním stavů objektu. Nejvýhodnější jsou pak plně automatické diagnostické systémy řízeny zpravidla výpočetní technikou, které lze naprogramovat i k řešení poruchových stavů bez potřeby lidské obsluhy, automaticky lokalizovat poruchu a pak zaslat tento údaj na řídicí terminál.

Diagnostický systém OFF-LINE jinými slovy diagnostický systém testovací. Pro diagnostikování je nutno zařízení odstavit z provozu. Použití těchto metod vyžaduje použití cizí zdroj elektrické energie s určitými vlastnostmi, které jsou vhodné pro měřicí metodu.

Algoritmy diagnostikování testem se dělí na závislé a nezávislé. U nezávislých testů je posloupnost jednotlivých kroků testu nezávislá na výsledcích předešlých kroků testu. Vyhodnocení provozuschopnosti je tedy podmíněno provedením všech kroků testu. Naproti tomu závislý algoritmus testu provádí jednotlivé kroky testu v závislosti na výsledcích předcházejících kroků. Je patrné, že závislý test je časově mnohem méně náročný.

Testovací signály mohou být přivedeny na provozní vstupy objektu, přičemž lze simulovat cílové chování objektu nebo jsou testovací signály přivedeny, jak na provozní vstupy, tak na pomocné diagnostické vstupy objektu. Oproti výše uvedeným systémům ON-LINE umožňují takto definované systémy OFF-LINE mnohem snadněji určit poruchy. Metody diagnostikování testem lze využít i u provozních systémů za předpokladu, že testovací signály na pomocných vstupech neovlivní běžný chod objektu. Aby výsledky diagnózy byly porovnatelné, je nutné během diagnostikování nastavit předem definované hodnoty vstupních a řídicích signálů.

Diagnostické systémy se vlastním provedením dále dělí dle toho, ve které fázi technického života bude objekt diagnostikován. Rozhodujícími fázemi bude výroba, provoz, servis a údržba objektu.

Údržba se provádí těmito způsoby:

- a) údržbou po poruše objektu,
- b) údržbou podle časového plánu,
- c) údržbou podle skutečného stavu objektu.

Nejméně vhodným způsobem je provádět údržbu po poruše objektu. Kompletní porucha funkční části objektu má za následek výpadek technologického procesu, možnost následného porušení následujících objektů, narušení bezpečnosti provozu. Nejčastěji je tato údržba užívána u elektronických obvodů. Údržba dle časového plánu je vykonávána na základě statistických předpokladů oprav jednotlivých komponentů objektu v předem pevně stanovených časových úsecích. Tento způsob údržby je ekonomicky nevýhodný, protože k údržbě objektu dochází buď příliš brzo, nebo příliš pozdě. Je známo, že technické parametry zařízení se velmi často zhorší pouhou demontáží a následnou montáží. Přesto se tento způsob praktikuje z bezpečnostních důvodů. Ekonomicky nejvhodnější je údržba dle skutečného stavu objektu. [2]

2.1.4 Diagnostická veličina

Diagnostická veličina je veličina, která je nositelem informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu. Největším problémem v technické diagnostice je, že značnou část vnitřních strukturních a procesních parametrů nelze přímo měřit, protože měřicí body jsou bez nežádoucí demontáže nepřístupné. Měřit tedy lze jen na přístupových výstupních prvcích systému (ať už na hlavních funkčních výstupech nebo na řadě pomocných diagnostických výstupů) a vnitřní parametry z naměřených diagnostických veličin při použití různých diagnostických algoritmů s určitou přesností odhadnout. Je důležité si uvědomit, že pokud je diagnostická veličina nepřímou funkcí měřeného strukturního parametru, pak kauzalita bude mít většinou stochastický charakter. Stochastické chování však vykazují i přímo měřitelné prvky systému. Jedné příčině může odpovídat více různých následků a naopak, jeden následek může být vyvolán různými příčinami.

K zjištění technického stavu jednotlivého prvku jsou někdy používány statistické charakteristiky nebo veličiny, které jsou z více diagnostických veličin vypočteny (jedná se o tzv. diagnostické ukazatele). Vlastnosti nedostupných prvků lze často deterministicky nebo statisticky definovat jen na základě množiny příznaků technického stavu. Množinu příznaků je možno definovat jako soubor nepřímo měřitelných projevů změn vlastností prvku na dostupném místě. Za příznaky lze považovat nejen hodnoty fyzikálních diagnostických veličin, ale také hodnoty odvozené z těchto veličin jako je např. efektivní hodnota, střední hodnota, složka frekvenčního spektra, časová konstanta přechodové charakteristiky. [2]

2.1.5 Funkčnost, porucha, schopnost provozu

Funkčnost objektu je schopnost objektu vykonávat určitou funkci podle technických podmínek. Objekt může být ve stavu funkčním, ale ne provozuschopným.

Porucha je projev určující ukončení provozuschopnosti objektu.

Provozuschopnost objektu je stav, ve kterém je objekt schopen vykonávat stanovené funkce dle technických podmínek.

Objekt je neporušený, jestliže technický stav všech elementárních prvků objektu je v mezích technických podmínek provozu. Objekt může být funkční, provozuschopný, ale není bez závad. V technické praxi zřídka kdy dochází k tzv. náhlé poruše (poruše vzniklé skokovou změnou jednoho nebo více strukturních parametrů objektu). Určité hodnoty diagnostických parametrů se časem mění a blíží se k nepovoleným hranicím.

U strojů zhoršování způsobuje např. abrazivní, adhezní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační opotřebení, koroze. Porucha v uvedených příkladech vzniká postupně, některé hodnoty diagnostických parametrů se časem mění a blíží se k nepřijatelným mezím. [2]

2.2 Diagnostické metody

Žádná z diagnostických metod neodhalí všechny poruchy najednou. Pro dobrou diagnostiku stroje se musí použít série vhodných diagnostických metod. Množství testů je dáno i tím, jestli jsou testy na sobě závislé či nikoliv.

Diagnostické metody se dělí na destruktivní, polo a nedestruktivní. Destruktivní zkoušky se zpravidla provádí ve zkušebnách a zjišťují se krajní meze daného zařízení. V technické diagnostice se používají nedestruktivní zkoušky, které napoví více o stavu zařízení a jeho vlastnostech.

Pro diagnostiku asynchronního motoru byly vybrány tyto metody:

- měření zdánlivého izolačního odporu,
- zkouška rázovou vlnou,
- měření vibrací,
- rozbor proudových spekter,
- analýza hlukových emisí,
- měření teploty pomocí termografie,
- měření ztrátového činitele,
- měření částečných výbojů.

Tyto metody byly vybrány, protože jsou nejrozšířenější v oblasti diagnostiky elektromotorů, kromě těchto existuje spousta jiných vhodných metod pro diagnostikování elektromotorů.

V tabulce tab. 2.1 je přehled diagnostických signálů pro určení dané poruchy asynchronního stroje. Pro přesné určení poruchy je vhodné mít více posuzovaných signálů, při jejich shodě je výsledek věrohodnější.

Tab. 2.1 – Poruchy asynchronních strojů

Porucha	Diagnostická veličina
Poškození statorového vinutí	rozptylové magnetické pole, rázová vlna, zdánlivý izolační odpor, ztrátový činitel
Poškození rotorových tyčí a kruhů	statorový proud, magnetické pole
Poškození magnetického obvodu	magnetické pole, statorový proud, vibrace
Poškození ložisek	vibrace, hluk, teplota

2.2.1 Měření zdánlivého izolačního odporu

Měření izolačního odporu izolace patří k základním diagnostickým metodám. Metodou se zjišťuje stav izolace daného objektu.

Izolační soustavu elektrického stroje je možno si představit jako dielektrikum kondenzátoru. Jednu jeho elektrodu tvoří vinutí měřené fáze a druhou elektrodu tvoří statorová kostra se všemi dalšími uzemněnými částmi stroje. Po přiložení stejnosměrného napětí k tomuto kondenzátoru začne dielektrikem protékat nabíjecí proud, který se v závislosti na čase zmenšuje. Jeho průběh lze vyjádřit vzorcem

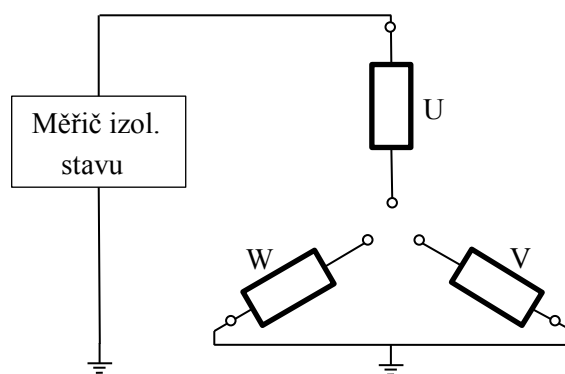
$$i_b(t) = i_c(t) + i_a(t) + i_i \quad (\text{A}) \quad (2.2)$$

i_b - nabíjecí proud,

i_c - kapacitní proud, který zaniká v tisícinách sekundy,

i_a - absorpční proud, který vyvolává polarizace dielektrika a který zaniká řádově v minutách,

i_i - izolační proud, který trvale prochází dielektrikem.



Obr. 2.2 - Schéma zapojení pro měření zdánlivého izolačního odporu statoru třífázového točivého elektrického stroje

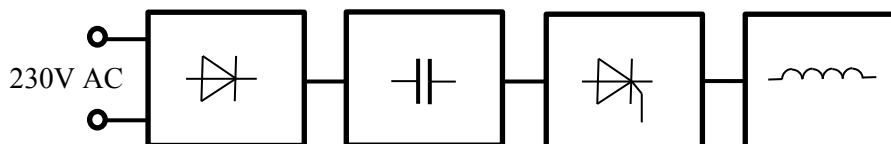
Za předpokladu, že je známa velikost přiloženého napětí a změřil-li se průběh nabíjecího proudu, je možno stanovit průběh závislosti U/I na čase. Tato funkce je ovlivňována měrným odporem izolace, permitivitou, geometrickými rozměry izolace a teplotou. Pokud se měření provádí pravidelně v určitých intervalech zhruba se stejnou teplotou vinutí, lze při porovnání výsledků zanedbat vliv teploty a geometrických rozměrů. Odchyly v závislosti na měření jsou pak způsobeny změnou měrného odporu nebo permitivity. Tyto změny obvykle způsobuje navlhnutí nebo znečištění izolační soustavy. [1,2]

2.2.2 Zkouška rázovou vlnou

Zkouška rázovou vlnou se řadí mezi nezátěžové srovnávací zkoušky. Touto zkouškou se zjišťuje stav izolace vinutí elektrických strojů, zdali nenastal mezizávitový nebo mezifázový zkrat. Metoda odhalí nestejný počet závitů vinutí elektrického stroje a jiné nesymetrie vinutí.

Zkouška se provádí současně na dvou vinutích, na které se připojí rázový generátor. Ten funguje na principu vybíjení dvou identických kondenzátorů připojených k cívkám. Krátké napětíové pulzy způsobí velký gradient, který vytváří okamžité napětíové namáhání mezi závitů.

Následný rezonanční tlumený děj na zátěži se zaznamenává pomocí osciloskopu. Poněvadž špička rázové vlny má hodnotu až desítky kV, osciloskop snímá napětíový průběh přes kapacitní dělič. Každá cívka má svůj jednoznačný charakter odezvy na danou vlnu.



Obr. 2.3 - Blokové schéma generátoru rázové vlny

2.2.3 Měření vibrací

Mechanické kmitání je dynamický jev, při němž tělesa vykonávají obousměrný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy. Tuhé těleso je popsáno jako celek, který lze nahradit hmotným bodem a termín kmitání je obdobný k pojmu vibrace. Kmitání lze popsat polohovým vektorem tj. amplitudou a fází v časovém okamžiku.

Kmitání stroje je svázáno s dynamickým namáháním stroje a technickým stavem hřídele, ložisek, klikových ústrojí, nevyvážených rotujících součástí, vůlemi v kluzných ložiscích atd. Technický stav uvedených strojních částí je dán opotřebením, uvolněním spojů, únavovými lomy, korozi i jinými jevy. [2]

Vibrodiagnostiku lze vykonat u elektrických strojů bez zastavení a demontáže. Je možno zjistit jejich stav po mechanické i elektrické stránce. Metoda se řadí mezi metody provozní.

Elektrický točivý stroj je vždy spojen s pracovním mechanismem, který na něj působí. Proto je při posuzování elektrických strojů nutné pohlížet na technický stav poháněného mechanismu a při posuzování poháněcího mechanismu je nutno přihlížet na technický stav elektromotoru. Dále je při provádění metodiky důležité vyznačení měřicích bodů. Zásada při jejich určování je taková, aby měřicí bod byl co nejbližší ložisku. Ložisko je zdrojem informací o kontrolovaném stroji a také

o sobě samém. Měřicí body musí být trvale vyznačeny na kontrolovaném stroji pro zaručení opakovatelnosti měření. [4]

Příčiny, které způsobují vibrace strojů a zařízení jsou mechanického a elektromagnetického původu.

Mechanické příčiny jsou statická nebo dynamická nevyváženost rotační části, ohnutá hřídel, chybný konstrukční návrh ložiskových uzlů, nepřesnosti stroje zejména v oblasti uložení ložisek, nepřesnosti nebo poškození ložisek, chybná montáž stroje, nevhodná nebo poškozená spojka, hnací řemen a jeho napnutí, nesouosé spojení ozubenými koly.

Elektromagnetické příčiny jsou méně optimální návrh stroje, zejména negativní vliv drážkování rotoru a statoru, druh vinutí, přesycení, nepřesnosti ve vzduchové mezeře, nesymetrie motoru, přerušené tyče rotorového vinutí, přerušené kruhy, ložiskové proudy, nesymetrie některých částí magnetického obvodu. Tyto nesymetrie mají vliv na vznik harmonického magnetického pole, proudu a pulsace magnetického toku.[16]

Vyhodnocení je prováděno v časové nebo frekvenční oblasti. Pro převod z časové do frekvenční oblasti se využívá rychlé Fourierovy transformace.

2.2.4 Analýza statorových proudů

Analýzou proudů protékajících statorem je možno určit některé závady. Tyto závady se projeví jako nasuperponovaná hodnota na základní harmonickou proudu. Většina poruch má svou specifickou frekvenci obdobně jako u vibrodiagnostiky.

Výhodou této metody je, že tato veličina je k dispozici za běžného provozu motorů. Není zapotřebí přerušovat provoz měřeného objektu. K měření je zapotřebí proudového čidla a příslušného záznamového zařízení, odkud je možno data o průběhu proudu přenést do frekvenčního analyzátoru nebo počítače a provést frekvenční analýzu. Čím bude porucha závažnější, tím bude větší i amplituda postranních pásem o určité frekvenci. Pokud rozdíl dané frekvence oproti základní bude menší než 40 dB, lze tuto frekvenci brát za poruchu. Poté následně určit o jakou poruchu se jedná. [15]

2.2.5 Analýza hlukových emisí

Sledováním zvuku ve frekvenčním pásmu se zabývá akustika. Zvuk se dá rozdělit do tří pásem: infrazvuk, slyšitelné pásmo (20 Hz – 20 kHz) a ultrazvuk. Množství zvuku, jehož působení je nežádoucí, je nazýváno hlukem. Hluk může být zdrojem informace o technickém stavu stroje. Při provozu elektrických strojů je v jejich okolí vždy přítomný hluk způsobený různými částmi a

systémy stroje. U točivých elektrických strojů jsou dominantní tři skupiny hluku. Hluk elektromagnetického původu, hluk mechanického původu a hluk ventilačního původu.

Hluk se na rozdíl od ultrazvuku šíří nejen kapalinou a pevnou hmotou, ale i vzduchem a to na velké vzdálenosti. Při diagnostikování míry hluku v uzavřených prostorách nastávají odrazy a interference a kromě hluku z diagnostikovaného objektu je prostor ozvučen hlukem ostatních hluk vydávajících objektů, což komplikuje lokalizaci vlastního zdroje hluku. [2]

Měření je uskutečňováno za provozu při zatížení jmenovitými parametry. Diagnostika hluku stroje nesleduje absolutní hodnoty akustického tlaku, ale jsou sledovány změny a vývoj měřených veličin v závislosti na čase provozu stroje. Je sledován poměr jednotlivých měření, míra nárůstu hladiny hluku apod. [8]

2.2.6 Měření teploty pomocí termografie

Měření teploty lze provést klasickým kontaktním způsobem. Přiložením teplotního senzoru na požadovaný objekt nebo do části určitého objektu, např. u velkých strojů se teplotní senzor vloží na dno drážky a snímá se přímo teplota vinutí.

Termografií se dá zjišťovat teplota pouze na povrchu tělesa, ale zato bezkontaktně za provozu objektu bez jakékoli odstávky. Toto je vhodné pro preventivní údržby. Využívá se zde infračervené radiace (sálání).

Sálání se na rozdíl od vedení a proudění dokáže šířit vakuem, chová se jako světlo a taktéž se pohybuje rychlostí světla. Každé těleso, jehož teplota je vyšší než absolutní nula vyzařuje energii. Tato vyzařovaná energie je úměrná čtvrté mocnině své absolutní teploty. Tepelná sálavá energie přenášená mezi dvěma povrchy je úměrná třetí mocnině tepelného rozdílu mezi oběma povrchy. Tepelná infračervená radiace opouštějící povrch tělesa se nazývá radiační excitance nebo radiosita. Celková excitance je dána součtem jednotlivých složek, tj. části emitované W_e , odražené W_r a části prostupující W_t . Teplota povrchu je závislá pouze na emitované energii W_e .

Obdobně jako světelná energie tak tepelná radiace je šíření fotonů v elektromagnetickém spektru. Přenos světelné energie se děje ve viditelné oblasti spektra od 0,4 μm do 0,75 μm , přenos tepla radiací zabírá oblast spektra mezi 0,75 μm a asi 100 μm .

Pro teplo vyzařované z povrchu těles platí Stephan-Boltzmannův zákon:

$$W = \sigma \varepsilon T^4 \quad (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}) \quad (2.3)$$

kde W - radiační tok jednotkou plochy,

ε - emisivita,

δ - Stephan-Boltzmannova konstanta = $5,673 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,

T - absolutní teplota tělesa.

Pro hodnotu vlnové délky s maximální radiací λ_m na povrchu tělesa platí Wienův zákon:

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad (\mu\text{m}) \quad (2.4)$$

kde λ_m – maximální vlnová délka,

b - Wienova konstanta = 2897 $\mu\text{m}\cdot\text{K}$.

Rozlišují se tři typy povrchů těles: absolutně černé, bílé a šedé (tzv. reálné) těleso. Absolutně černé těleso je definováno jako teoretický povrch, který má jednotkovou emisivitu v celém rozsahu vlnových délek, a které absorbuje veškerou dopadající radiační energii, která na něj dopadá. Naopak absolutně bílé těleso veškerou energii odráží.

Emisivita reálného tělesa je definována jako poměr radiačních energií emitovaných z povrchu daného tělesa a tělesa černého při stejné teplotě.

Infračervená radiace z tělesa prochází různými látkami na své cestě k infračervenému přístroji. Pokud je touto látkou vakuum, pak neztrácí žádnou energii. V praxi to je zpravidla vzduch. Pro krátké vzdálenosti, např. několik metrů, lze vliv vzduchu zanedbat. Pokud tato vzdálenost vzroste, pak je zdrojem chyb. Jsou dva spektrální intervaly, které jsou relativně prosté ztrát z absorpce. Jde o tzv. atmosférická "okna" v pásmu 3 - 5 μm a v pásmu 8 - 14 μm .

K termoviznímu měření se používá termovizní kamera. Ta vytváří termovizní snímky (termogramy) o určitém rozlišení. Pomocí řídicího obvodu je signál převeden z infračerveného spektra do spektra viditelného. V termogramu je každé hodnotě teploty přiřazen určitý barevný odstín nebo odstín šedi.

Termovizní měření se využívá v elektrotechnice jako prostředek k identifikaci problémových míst při výrobě, přenosu a distribuci elektrické energie. [2]

Hlavním kritériem pro rozhodnutí, zda jde o spoj špatný nebo zda spoj špatný není, je absolutní teplota spoje nebo teplotní rozdíl vůči ostatním spojům. Měřením, postupným sledováním a porovnáváním s archivovanými hodnotami lze rozhodnout o kvalitě sledovaného spoje.

Měření oteplení svorek, spojů a elektrických zařízení se doporučuje uskutečňovat alespoň při 50% zatížení. Při menším zatížení se do výsledku zanáší určitá chyba. Dále musí být měřené místo minimálně 60 minut zatíženo. Svorka nebo spoj, které jsou v pořádku, nemají být teplejší než vodič, na který jsou svorky připojeny. Spoje s vyšší teplotou než připojený vodič jsou klasifikovány podle oteplení a naléhavosti odstranění závady do čtyř stupňů.

U zjištěné závady je určena teplota kritického místa a okamžité proudové zatížení. [2]

Tab. 2.2 – Stupeň klasifikace

Stupeň klasifikace	Rozmezí teplot	Opatření
I. stupeň	$0\text{ °C} < \Delta\vartheta < 10\text{ °C}$	žádné opatření
II. stupeň	$10\text{ °C} < \Delta\vartheta < 35\text{ °C}$	opravit při plánované revizi
III. stupeň	$35\text{ °C} < \Delta\vartheta < 100\text{ °C}$	opravit do jednoho měsíce
IV. stupeň	$\Delta\vartheta > 100\text{ °C}$	opravit okamžitě

3 Vývojové trendy v diagnostice

Vývojový trend v diagnostice elektrických zařízení směřuje z občasných prohlídek k periodické kontrole zařízení, až k nepřetržitému monitorování (on-line). Tento trend je ovlivněn zvýšenými pořizovacími náklady daných zařízení a zvýšenými požadavky na spolehlivost provozu.

Rozvojem výpočetní techniky a jejím začleňováním do diagnostiky je umožněn vývoj nových moderních metod a zdokonalování stávajících metod. Výpočetní technika v diagnostice se používá především pro zpracování a archivaci naměřených dat. Někteří výrobci dávají svou centrální diagnostickou databanku uživatelům k dispozici. Naměřené hodnoty se obvykle digitalizují, což umožňuje lepší porovnávání s jinými daty a v oblasti počítačového zpracování signálů otevírá velké možnosti. U digitálního signálu je možno provádět rychlou lokalizaci poruch, potlačovat nebo úplně eliminovat rušení nebo provádět statistické zpracování hodnot.

Taktéž s vývojem technologie je snaha měřicí zařízení miniaturizovat na velikost přenositelného zařízení, pokud možno i s vlastním zdrojem energie. S požadavkem on-line měření se měřicí senzory a čidla začleňují i do konstrukce daných zařízení. Což však vede k zvýšení finančních nákladů za dané zařízení.

Dřívější občasné nebo nepravidelné kontroly stavu izolace již byly nahrazeny pravidelnými měřeními celou skupinou diagnostických metod. Výběr metod do této sestavy je ovlivněn nejen schopností metody vypovědět informace o stavu zařízení, ale i požadavky na přerušení provozu a v neposlední řadě i stupněm ohrožení izolace průrazem při měření. Většina zkušebních organizací má ve svém souboru diagnostických metod kromě vizuální kontroly i měření polarizačního indexu, můstková měření (měření $\tan \delta$, C), měření analyzátozem dielektrických ztrát, měření částečných výbojů a také některou z výdržných napětových zkoušek.

Celosvětový trend ve vývoji diagnostiky vinutí strojů velkých výkonů je směřován k nepřetržitému monitorování stavu a kontinuálnímu sledování provozuschopnosti těchto strojů. To vyžaduje metody a zařízení, které jsou schopny okamžitě snímat, zpracovávat a vyhodnocovat informace o stavu stroje, popřípadě i rozhodovat o jeho dalším provozu. Pro vyhodnocování se vyvíjejí tzv. expertní systémy, které zpracovávají různé druhy signálů a parametrů vhodných diagnostických metod, např. částečné výboje (elektricky i ultrazvukově), obsah plynů rozpuštěných v chladivu, teplotu vinutí a ložisek, akustickou emisi, vlhkost, vibrace, přepětí, nadproudy aj. Tyto vstupní informace jsou porovnávány pomocí počítače s naprogramovaným komplexním modelem nebo jsou porovnávány se zadanými limitními hodnotami a jejich překročení je hlášeno obsluze, která rozhodne o dalším provozu stroje. Složitější systémy dokáží provádět hlubší analýzu signálů a vydávat přímo rozhodnutí o stavu objektu. [14]

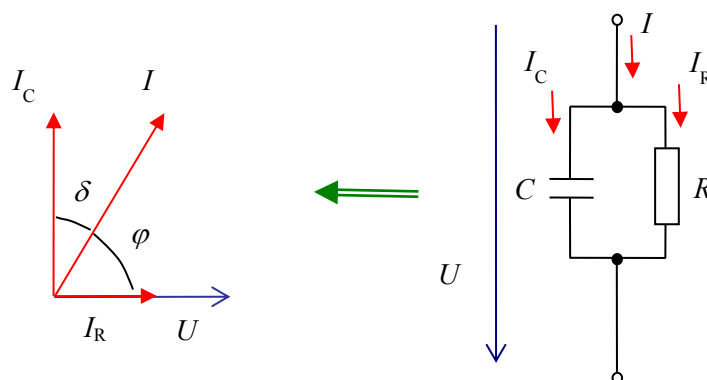
Současným vývojovým trendem v diagnostice je zdokonalování a zpřesňování diagnostických metod zejména u měření ztrátového činitele, měření částečných výbojů aj. Díky

novým technologiím a lepší technice je možné tyto metody uplatňovat častěji, taktéž měřicí aparatura se stává přenosnější a přesnější. Bližší rozbor těchto metod je v následujících kapitolách.

3.1 Měření ztrátového činitele

Na izolaci elektrických strojů lze pohlížet jako na dielektrikum složené z řady kondenzátorů, kde elektrody tvoří vinutí a železo magnetického obvodu. Ztrátový činitel izolace je uvažovaný jako dielektrikum těchto kondenzátorů. Při přiložení střídavého napětí k tomuto kondenzátoru začne dielektrikem protékat proud. Ideální dielektrikum nemá činné ztráty, vektory nabíjecího proudu a přiloženého napětí má kapacitní charakter a vůči sobě svírají fázový posun $\varphi = 90^\circ$.

Jelikož izolační materiály používané v elektrotechnických zařízeních nejsou ideální, proud procházející dielektrikem obsahuje kromě jalové i činnou složku, která je způsobena vodivostí a polarizací dielektrika.



Obr. 3.1 – Fázorový diagram [10]

Činná složka proudu je způsobena těmito jevy:

- odpor izolačního materiálu je velký, ale není nekonečný,
- při výrobě izolačního systému v důsledku nedokonalé technologie mohou vznikat dutiny (defektní místa) vyplněné vzduchem. V případě, že v dutině překročí elektrická intenzita hodnotu zapalovacího napětí plynu, dojde ke vzniku částečných výbojů. Proud částečných výbojů má výraznou činnou složku,
- dielektrikum se v elektrickém poli polarizuje, polarizační proud má kromě jalové složky i složku činnou.

Činitel dielektrických ztrát (ztrátový činitel) $\tan \delta$ je definován jako tangenta úhlu, o který se liší fázový posun reálného proudu protékající dielektrikem od fázového posunu proudu ideálního dielektrika. Hodnota činitele dielektrických ztrát lze považovat za měřítko kvality izolačního systému. Činitel dielektrických ztrát je bezrozměrná veličina.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (-) \quad (3.1)$$

Dielektrické ztráty jsou součtem vodivostních, polarizačních a ionizačních ztrát. Zvýšení dielektrických ztrát poukazuje obvykle na stárnutí izolace.

Odpor izolačního materiálu nemá nekonečnou hodnotu, z tohoto důvodu protéká dielektrikem po přiložení napětí vodivostní proud, který je odpovědný za vodivostní ztráty. Následné stárnutí izolace způsobí pokles hodnoty izolačního odporu a tím se zvýší vodivostní ztráty.

Po přiložení střídavého napětí na dielektrikum, mění neustále volné elektrické náboje svůj směr v závislosti na směru intenzity elektrického pole a dochází k polarizaci dielektrika. V důsledku zpomalování pohybu volných nábojů a změnou intenzity elektrického pole část energie z elektrického pole zůstává ve formě kinetické energie a přenáší se na ostatní (neutrální) částice materiálu. Dochází k ohřevu dielektrika a vzniku polarizačních ztrát.

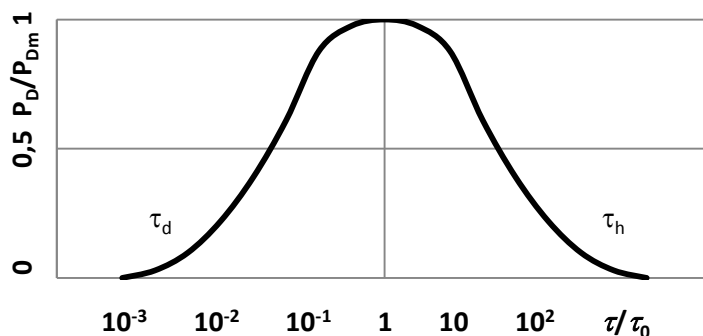
Pokud se v dielektriku nacházejí nehomogenity v podobě dutinek, po překročení zápalného napětí v dutince dochází ke vzniku částečných výbojů. A tím k nárůstu ionizačních dielektrických ztrát. V praxi je často dielektrikum kombinací dvou dielektrik, např. olej - papír, pevné skupenství - plyn, kde v důsledku navlhnutí a znečištění izolace mohou vznikat výboje rozvíjející se po povrchu pevného izolantu. Povrchové výboje také přispívají k nárůstu ionizačních dielektrických ztrát.

Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ je závislý na několika faktorech. V závislosti na frekvenci měřicího napětí se vyšetřuje určitá frekvenční oblast, která je ovlivněna skupinou elementárních polarizačních procesů. Je nutné určit jakými elementárními polarizačními procesy z polarizačního spektra je ovlivněna hodnota dielektrických ztrát, pokud je měřeno napětí a frekvence f_0 . Polarizační děj s dobou ustálení τ_0 způsobuje největší ztráty na frekvenci $f_0 = \frac{1}{2\pi\tau_0}$. Pokud se změni frekvence přiloženého napětí směrem nahoru nebo dolů, tak poklesne hodnota naměřených dielektrických ztrát. V případě, že měření dielektrických ztrát v izolantu, který má spojitě polarizační spektrum, se měřicí napětí o frekvenci f_0 , potom největší ztráty způsobuje elementární proces s dobou ustálení $\tau_0 = \frac{1}{2\pi f_0}$.

Vliv elementárních procesů různých od τ_0 je znázorněn na obr. 3.2. Polarizační děj s dobou ustálení posunutý o jeden řád od τ_0 přispívá k výsledné hodnotě polarizačních ztrát jen 20% a vzdálenější proces ještě méně. Pokud je uvažováno desetiprocentní hranici polarizačních ztrát je vidět, že dielektrické ztráty měřené frekvencí f_0 jsou ovlivněny elementárními procesy v rozsahu tří řádů. Z toho vyplývá, že dielektrické ztráty jsou ovlivněny z intervalu $0,03 \tau_0 < \tau < 50 \tau_0$.

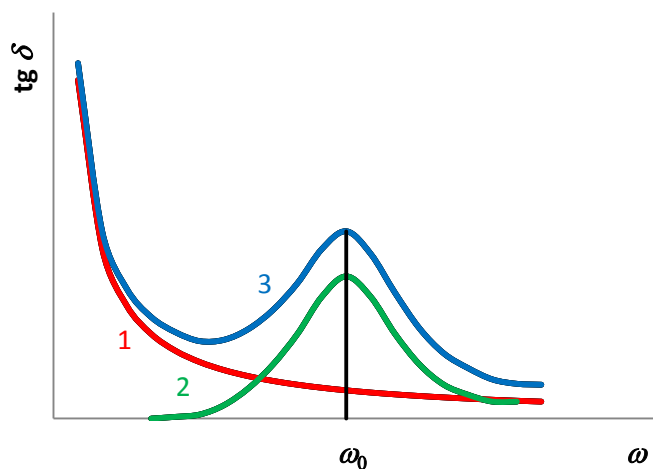
U dielektrika po připojení na střídavé napětí vznikají dielektrické ztráty

$$P_D = \omega \cdot U^2 \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (\text{W}) \quad (3.2)$$



Obr. 3.2 - Vliv elementárních procesů na výslednou hodnotu polarizačních ztrát [6]

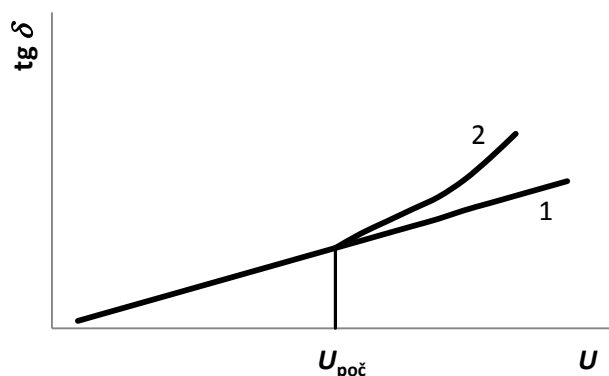
Frekvenční závislost ztrátového činitele je uvedena na obr. 3.3. V případě izolace s relativně vysokou hodnotou vodivosti bude $\operatorname{tg} \delta$ v závislosti na frekvenci klesat (křivka 1 obr. 3.3). Izolace s jedním polarizačním dějem má své maximum (křivka 2 obr. 3.3). Závislost $\operatorname{tg} \delta = f(\omega)$ reálného dielektrika představuje kombinaci prvních dvou závislostí (křivka 3 obr. 3.3). V případě složitějšího dielektrika může existovat několik polarizačních dějů s různou dobou ustálení, proto závislost $\operatorname{tg} \delta = f(\omega)$ může mít několik maxim.

Obr. 3.3 - Frekvenční závislost $\operatorname{tg} \delta$ [6]

Čím je izolace kvalitnější, tím jsou nižší dielektrické ztráty. Kvalitní izolace je popisována co nejnižšími hodnotami činitele dielektrických ztrát. Pro kvalitní izolaci platí, že hodnoty činitele dielektrických ztrát se jen málo mění v závislosti na velikosti přiloženého napětí.

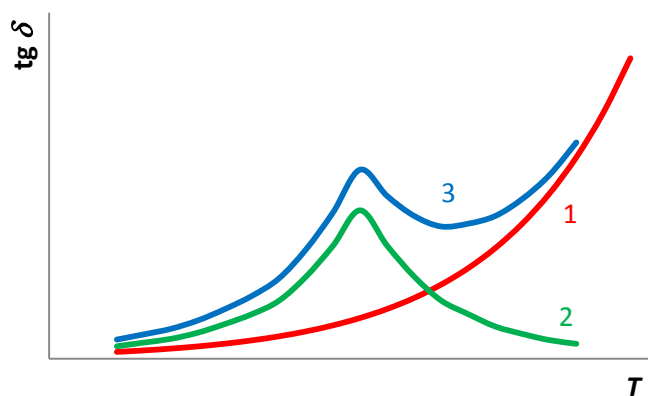
Zvyšováním intenzity elektrického pole působícího na izolant se mění procesy, které ovlivňují hodnotu činitele dielektrických ztrát. Nejvíce je to pozorovatelné v případě, kdy nad určitou hodnotou napětí začne probíhat úplně jiný mechanismus ztrát způsobených ionizačními procesy. Napětí, při kterém křivka $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ náhle mění svou směrnici nahoru, se označuje jako práh ionizace nebo počáteční napětí výbojů $U_{\text{poč.}}$. Na obr. 3.4 křivka 1. ukazuje změnu hodnot

ztrátového činitele v závislosti na napětí kvalitního suchého izolačního systému, křivka 2 popisuje izolační systém, ve kterém jsou přítomny vzduchové mezery, popřípadě dutinky.



Obr. 3.4 - Napěťová závislost $\tan \delta$ [6]

Činitel dielektrických ztrát izolace je silně závislý na teplotě. Teplotní závislost $\tan \delta$ je uvedena na obr. 3.5. Ztráty, které souvisejí s elektrickou vodivostí izolace, monotónně narůstají při zvyšování teploty (křivka 1). Polarizační ztráty mají i při homogenním izolantu v závislosti na teplotě maxima (křivka 2). Maximální ztráty jsou při teplotě, při které viskozita je taková, že její příslušná časová konstanta τ se právě rovná $\frac{1}{2\pi f_{\max}}$, kde f_{\max} je frekvence působícího elektrického pole. Izolace, ve které dielektrické ztráty jsou ovlivněny vodivostí a polarizací, jsou teplotně závislé podle křivky 3. [6]



Obr. 3.5 - Teplotní závislost $\tan \delta$ [6]

3.2 Měření částečných výbojů

V místech se sníženou elektrickou pevností, vlivem vysoké intenzity elektrického pole v izolaci, vznikají částečné výboje. Tyto výboje představují průraz plynných dutinek, lokální průraz malých objemů pevných nebo kapalných dielektrik nebo místní průraz po povrchu pevného dielektrika. Vznik dílčích výbojů závisí na tvaru elektrického pole ve vysoko napětovém zařízení a od elektro-fyzikálních vlastností použité izolace.

Definice pojmu "částečný výboj" dle normy ČSN EN 60270: lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostňuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. [25]

Částečné výboje jsou často doprovázeny vyzařováním světla, tepla zvuku, a chemickými reakcemi.

Při výrobě izolačního systému nelze vždy zabránit vzniku nehomogenit v dielektriku. Pokud se tato nehomogenita nachází mezi elektrodami vysokého napětí, může namáhání elektrickým polem v nejslabším místě překročit pevnost tohoto místa, což vede k elektrickému výboji v tomto místě.

Obvykle částečné výboje nevyvolávají průraz celé izolace, ale dochází jen k lokálnímu poškození dielektrika. Při dlouhodobém působení částečných výbojů může dojít ke ztrátě elektrické pevnosti a následnému poškození elektroizolačního systému. Jejich postupná destruktivní činnost může po nějaké době vést až k porušení izolačního systému (vniku průrazů, zkratů, atd.) a havárii celého zařízení. S dobou a stárnutím dielektrika se zvyšuje četnost výbojové činnosti. [6]

Metody pro měření částečných výbojů je možno rozdělit na měření globální a měření lokalizační. Při globálním měření částečných výbojů se měří částečné výboje v celém zařízení nebo v jedné jeho fázi najednou. Lokalizační měření je měřením částečných výbojů s cílem zjistit místo jejich výskytu. Obě metody se v praxi doplňují.

K měření částečných výbojů je možno užít velké množství různých metod a to jak metody elektrické, tak i metody neelektrické. Každá z těchto metod má svoje klady a zápory. Záleží na možnostech měření. Do popředí se v současné době dostávají metody, které umožňují měřit bez odstávky nebo odpojení elektrického zařízení.

3.2.1 Akustická detekce

Částečné výboje v plynném, kapalném izolantu vykazují kromě elektrických i neelektrické efekty, které lze pozorovat, a dále i vyhodnotit. Jsou to především zvukové, optické i chemické projevy částečného výboje.

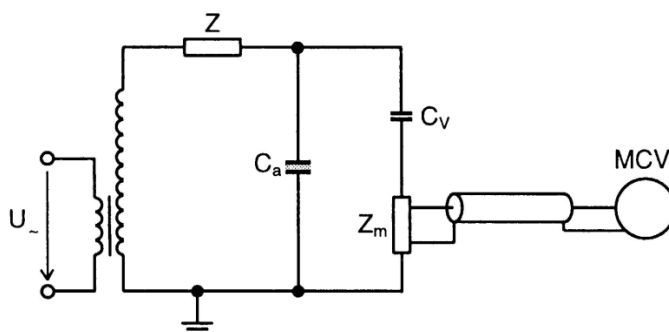
Detekce částečných výbojů akustickou metodou je založena na detekci akustických signálů v ultrazvukovém spektru. Tvar detekovaných signálů závisí na řadě okolností, jako např. na zdroji signálů, cestě signálů ze zdroje ke snímači, charakteristice snímače, druhu měřicího systému apod.

Akustické metody jsou vhodné pro určení místa vzniku částečných výbojů u transformátorů za provozu. Zde se elektrické metody nedají dost dobře uplatnit, z důvodů velkých elektromagnetických rušení, která nelze odstranit. Metody mohou být použity v režimu on-line.

3.2.1 Galvanická metoda měření částečných výbojů

Metoda patří mezi metody elektrické s globálním měřením částečných výbojů. Je založena na přímém snímání proudových impulsů částečných výbojů.

Impulsy částečných výbojů, které jsou na superponované na napájecím napětí, musí být od tohoto napájení vhodně odděleny. K tomu slouží snímací impedance, která obsahuje, kromě odporu řádu $10^2 \Omega$, i tlumivku. Zpravidla je měřicí impedance řešena RLC členem, který je navržen jako nízkofrekvenční propust a k němuž jsou paralelně připojeny ochranné prvky. Vývod ke snímači částečných výbojů je zpravidla proveden stíněným kabelem, aby se potlačil vliv rušení.



Obr. 3.6 – Základní zapojení pro měření částečných výbojů galvanickou metodou [14]

Na obr. 3.6 je naznačeno základní zapojení pro měření částečných výbojů, kde U_{\sim} je napájení obvodu, C_a označuje měřený objekt, C_v je vazební kapacita (vysokonapětový kondenzátor), Z_m je měřicí impedance a MCV představuje měřicí přístroj částečných výbojů. Impedance Z se někdy v měřicích obvodech používá k zamezení průchodu impulsů, vyvolaných výboji ve zdroji vysokého napětí, a ke snížení rušícího vlivu zdroje.

Vazební kondenzátor C_v je velmi důležitým prvkem měřicího obvodu. Musí být navržen pro plné testovací napětí, nesmí mít vlastní částečné výboje a musí mít malou impedanci. Aby se dosáhla co největší citlivost měření a měla by být jeho kapacita co největší. Příliš malá kapacita může zeslabit impulsy částečných výbojů natolik, že budou překryty vnějším rušením. [14]

4 Aplikace vybraných diagnostických metod

V rámci praktické aplikace diagnostických metod bylo uskutečněno měření na třech objektech. Jednalo se o asynchronní motory, bližší specifikace daných motorů je v kapitole 4.1.

Pro diagnostikování a zjištění stavu asynchronních motorů byly použity tyto metody:

- měření zdánlivého izolačního odporu,
- zkouška rázovou vlnou,
- měření ztrátového činitele,
- měření proudových spekter,
- měření vibrací.

Bližší teoretická specifikace jednotlivých metod je rozebrána v předcházejících kapitolách.

4.1 Měřené objekty

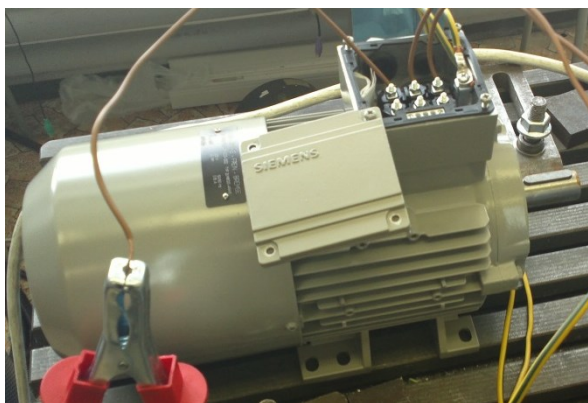
Měření probíhalo na třech třífázových asynchronních motorech s kotvou nakrátko od firmy Siemens o výkonu $P = 1,1 \text{ kW}$. Všechny motory byly obdobných parametrů.

Tab. 4.1 – Parametry motoru číslo 1

Parametr	Hodnota parametru
Typové označení	1LA7096-6AA10-Z
Výrobní číslo	UD 1210/1475226-003-002
Jmenovitý výkon	1,1 kW
Jmenovité napětí	230/400 V Δ/Y
Jmenovitý proud	5,0/2,9 A Δ/Y
Jmenovitá frekvence	50 Hz
Jmenovité otáčky	915 ot/min
Mechanické provedení	IM B3 90L
Krytí motoru	IP 55
$\cos \varphi$	0,77
Třída izolace	F

Tab. 4.2 – Parametry brzdy motoru číslo 1

Parametr	Hodnota parametru
Typové označení	2LM8020-4NA10
Výrobní číslo	UD 1210/1475226-003-002
Jmenovité napětí	230 V
Jmenovitý proud	0,15 A
Jmenovitá frekvence	50 Hz
Brzdící moment	20 Nm
Třída izolace	F



Obr 4.1 – Motor číslo 1

Tab. 4.3 – Parametry motoru číslo 2

Parametr	Hodnota parametru
Typové označení	1LA7096-6AA10-Z
Výrobní číslo	UD 1010/1303514-005-1
Jmenovitý výkon	1,1 kW
Jmenovité napětí	230/400 V Δ/Y
Jmenovitý proud	5,0/2,9 A Δ/Y
Jmenovitá frekvence	50 Hz
Jmenovité otáčky	915 ot/min
Mechanické provedení	IM B3 90L
Krytí motoru	IP 55
$\cos \varphi$	0,77
Třída izolace	F

Tab. 4.4 – Parametry brzdy motoru číslo 2

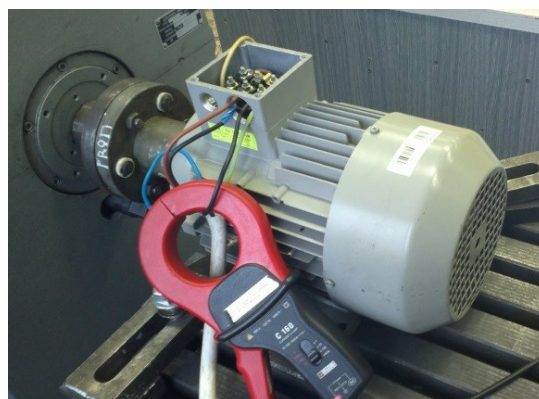
Parametr	Hodnota parametru
Typové označení	2LM8020-4NA10
Výrobní číslo	UD 1010/1303514-005-2
Jmenovité napětí	230 V
Jmenovitý proud	0,15 A
Jmenovitá frekvence	50 Hz
Brzdící moment	20 Nm
třída izolace	F



Obr 4.2 – Motor číslo 2

Tab. 4.5 – Parametry motoru číslo 3

Parametr	Hodnota parametru
výrobce	SIEMENS
Typové označení	1LA7096-6AA10-Z
Výrobní číslo	E 0605/501749
Jmenovitý výkon	1,1 kW
Jmenovité napětí	230/400 Δ /Y
Jmenovitý proud	5,0/2,85 Δ /Y
Jmenovitá frekvence	50 Hz
Jmenovité otáčky	915 ot/min
Mechanické provedení	IM B3 90L
Krytí motoru	IP 55
$\cos \varphi$	0,77
Třída izolace	F
Hmotnost	15 kg



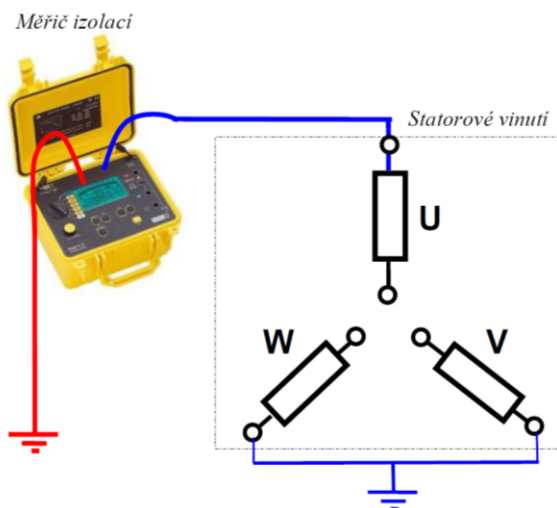
Obr 4.3 – Motor číslo 3

4.2 Zdánlivý izolační odpor

Pro měření izolačního odporu se zpravidla používají speciální přístroje, které mají vlastní zdroj stejnosměrného vysokého napětí a vestavěný ampérmetr se stupnicí kalibrovanou v ohmech. V tomto případě byl použit měřič izolačního stavu C.A 6545.

Napětí měřicího přístroje nesmí kolísat. Velikost měřicího napětí je dána hodnotou napájecího napětí přenásobená určitým koeficientem, např. pro stroje se jmenovitým napětím 10,5 kV a vyšším musí být měřicí napětí 5 kV, pro stroje s nižším napětím musí být měřicí napětí 2,5 kV, u zařízení do 1 kV je měřicí napětí 1 kV. Tyto hodnoty jsou stanoveny normou ČSN 33 1610.

I když je měření izolačního odporu v zásadě snadné, může zanedbání určitých zásad vést k chybám. Před měřením je nutné všechna vinutí uzemnit a nechat je uzemněná určitou dobu, aby se odstranil případný zbytkový náboj z dielektrika. Propojovací vodiče mezi měřeným objektem a měřičem izolace musí být co nejkratší, aby bylo možné zanedbat parazitní impedance přívodu. Pokud to nelze, je nutno výsledek přepočíst nebo použít stíněné kabely, které dokáží potlačit parazitní impedanci.

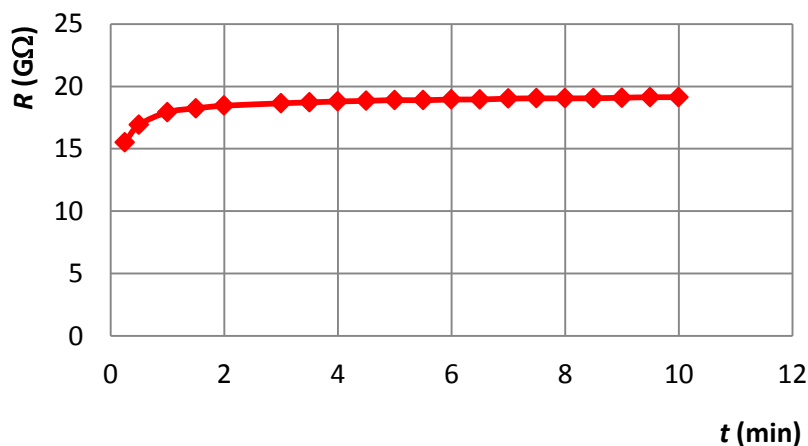


Obr 4.4 – Schéma zapojení

Výsledkem měření je závislost izolačního odporu na čase. Také se udávají velikosti izolačního odporu po uplynutí 15, 60 a 600 s od přiložení měřicího napětí.

Při vyhodnocení se sleduje absolutní velikost izolačního odporu od přiložení zkušební napětí a průběh funkce $R = f(t)$, případně změny těchto veličin oproti předchozímu měření.

U točivých elektrických strojů má být hodnota zdánlivého izolačního odporu při 600 s pro termoplastické izolační systémy větší než 600 MΩ a pro reaktoplastické systémy větší než 800 MΩ při teplotě 20 °C. [1]



Obr 4.5 – Nárůst hodnoty izolačního odporu na čase motoru č. 2

Z naměřených hodnot izolačního odporu se počítá jednominutový a desetiminutový činitel polarizace a koeficient dielektrické absorpce:

$$PI_{60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} \quad (-) \quad \text{a} \quad PI_{600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} \quad (-) \quad (4.1, 4.2)$$

$$DAR = \frac{R_{iz60}}{R_{iz30}} \quad (-) \quad (4.3)$$

U vícevrstvého dielektrika, kde je porušen pouze jeden izolant, přičemž ostatní izolanty vykazují vysokou hodnotu izolačního odporu, je kromě poměrů PI a DAR proveden i test vybíjení dielektrika DD . Test ignoruje paralelní povrchové unikající proudy. Zkušební napětí se přiloží na měřený objekt po definovanou dobu. Následně přístroj spustí rychlé vybíjení a měří její kapacitu a po uplynutí jedné minuty se měří unikající proud. [22]

$$DD = \frac{I_{60}}{U \cdot C} \quad (-; \text{mA}, \text{V}, \text{F}) \quad (4.4)$$

Indexy označují dobu od přiložení měřicího napětí, během které byl izolační odpor měřen.

Tab. 4.6 – Stav izolace v závislosti
v závislosti

na parametrech PI a DAR

Stav izolace vinutí	PI	DAR
Nedostatečný nebo nebezpečný	<1	<1,25
	<2	
Dobrý	<4	<1,6
Velmi dobrý, výborný	>4	>1,6

Tab. 4.7 – Stav izolace

na parametru DD

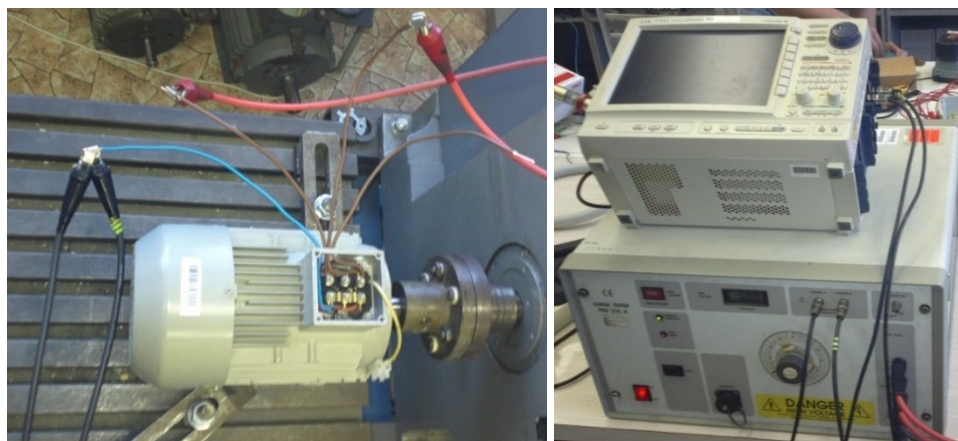
Stav izolace vinutí	DD
Velmi špatný	>7
Špatný	$7 > DD > 4$
Nejasný	$4 > DD > 2$
Velmi dobrý	< 2

Tab. 4.8 – Hodnoty naměřené přístrojem C.A 6545 při $U = 1 \text{ kV}$

	Motor č. 1			Motor č. 2			Motor č. 3		
	pro U	pro V	pro W	pro U	pro V	pro W	pro U	pro V	pro W
PI	0,91	0,93	0,86	1,07	1,11	1,10	1,04	1,01	1,01
DAR	1,00	1,00	0,99	1,06	1,07	1,08	1,01	1,01	1,01
DD	2,77	2,48	2,29	3,26	3,67	3,70	2,06	1,57	1,63
$I_{vyb} \text{ (nA)}$	993,50	801,80	434,80	53,06	50,85	41,89	131,10	111,80	112,80

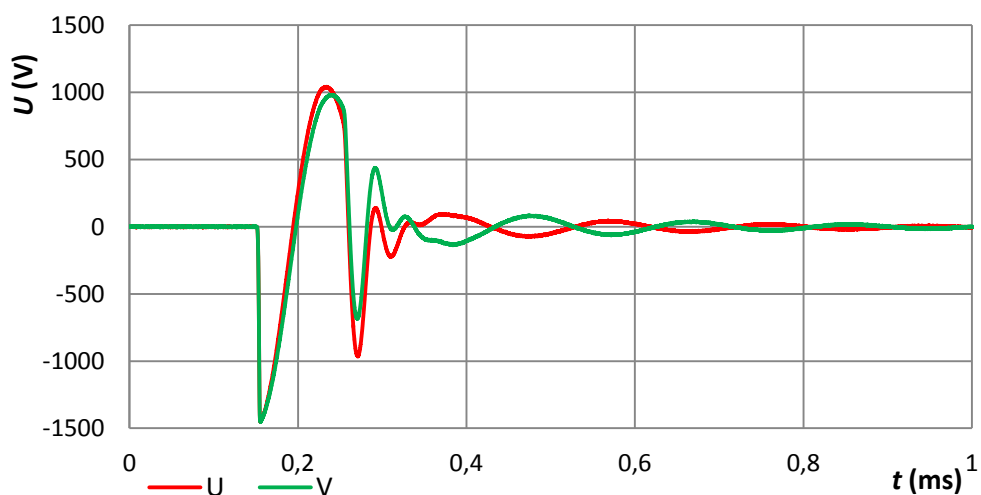
4.3 Zkouška rázovou vlnou

Pro zkoušku rázovou vlnou je použit rázový generátor PSG215A a pro zaznamenání odezvy napětového pulzu je použit osciloskop YOKOGAWA DL750 SCOPECORDER. K asynchronnímu motoru je přiveden na dvě vinutí současně vysokonapětový pulz, který vytvoří rázový generátor. Krátké napětové pulzy vytváří napětové namáhání dielektrika a ve vinutí vzniká tlumený přechodný děj. Pomocí osciloskopu je zaznamenána odezva, která je dále vyhodnocena. Každá cívka má svůj jednoznačný charakter odezvy na danou vlnu. Jedná se o zkoušku srovnávací.



Obr 4.6 – elektromotor a rázový generátor s osciloskopem

Pokud jsou cívky bez vady, odezvy jednotlivých průběhů jsou téměř totožné. Jestliže má jedna z cívek poruchu typu mezizávětového nebo mezifázového zkratu anebo odlišný počet závitů nebo má poškození proti zemi, pak průběhy křivek jsou od sebe odlišné.

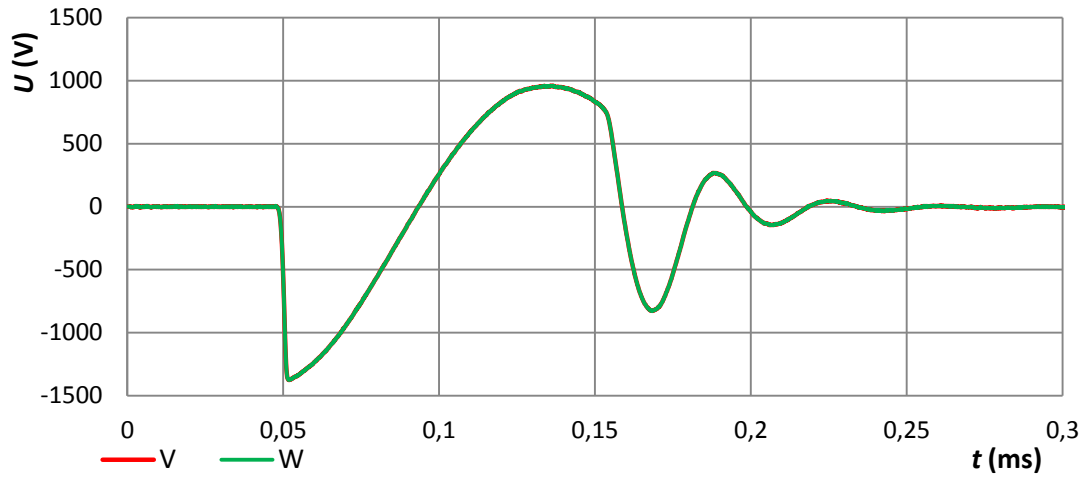


Obr 4.7 - Odezva na rázovou vlnu vinutí U a V motoru č. 3

Kdyby nastal případ, že by ve dvou cívkách vznikla stejná závada, není tato metoda schopna závadu odhalit. Ale pravděpodobnost vzniku identických poruch nebo identického poškození ve dvou nebo více zkoušených částech stroje najednou je zanedbatelná.

Velikost testovacího napětí je dána vztahem:

$$U_Z = 2 \cdot U_N + 1 \text{ kV} = 2 \cdot 400 + 1000 = 1800 \text{ V} \quad (4.5)$$



Obr 4.8 – Odezva na rázovou vlnu vinutí V a W motoru č. 1

Vyhodnocení daných odezev je možno provést buď pouhým okem, nebo pro přesnost odečíst dané difference mezi křivkami.

maximální difference:

$$U_{\max_V} = 960V$$

$$U_{\max_W} = 958,33V$$

$$|U| = U_{\max_U} - U_{\max_W} = 960 - 958,33 = 1,67V$$

minimální difference:

$$U_{\min_V} = -1376,7V$$

$$U_{\min_W} = -1378,3V$$

$$|U| = U_{\min_V} - U_{\min_W} = -1376,7 - (-1378,3) = 1,6V$$

peak – peak difference:

$$U_{\max_V} = 960V$$

$$U_{\min_V} = -1376,7V$$

$$|U_{pk_V}| = |U_{\max_V}| + |U_{\min_V}| = 960 + 1376,7 = 2336,7V$$

$$U_{\max_W} = 958,33V$$

$$U_{\min_W} = -1378,3V$$

$$|U_{pk_W}| = |U_{\max_W}| + |U_{\min_W}| = 958,33 + 1378,3 = 2336,63V$$

$$|U_{pk}| = |U_{pk_V}| - |U_{pk_W}| = 2336,7 - 2336,63 = 0,07V$$

integrální difference

$$|U_{ef}| \cong \frac{1}{T} \sum_{k=0}^n |\Delta T * u_{ak}(t)| - \frac{1}{T} \sum_{l=0}^n |\Delta T * u_{bl}(t)| = 401,4 - 400,5 = 0,9V$$

Tab. 4.9 – Vypočtené hodnoty diferencí

diference	U (V)								
	Motor číslo 1			Motor číslo 2			Motor číslo 3		
	U - V	U - W	V - W	U - V	U - W	V - W	U - V	U - W	V - W
maximální	8,34	11,66	1,67	1,7	1,6	5,0	60,0	1,6	50,0
minimální	6,70	8,40	1,60	6,7	6,7	6,7	0,0	3,3	3,4
peak - peak	15,04	20,06	0,07	8,4	5,1	1,7	60,0	1,7	57,4
integrální	2,50	2,40	0,90	0,2	1,5	1,7	11,2	1,3	9,2

4.4 Ztrátový činitel

K měření ztrátového činitele byl použit měřicí přístroj Megger DELTA 4000. Tento přístroj je schopen určit kromě ztrátového činitele i kapacitu mezi měřenými částmi v závislosti na napětí nebo na frekvenci.



Obr 4.9 – Elektromotor s měřicím přístrojem Megger DELTA 4000

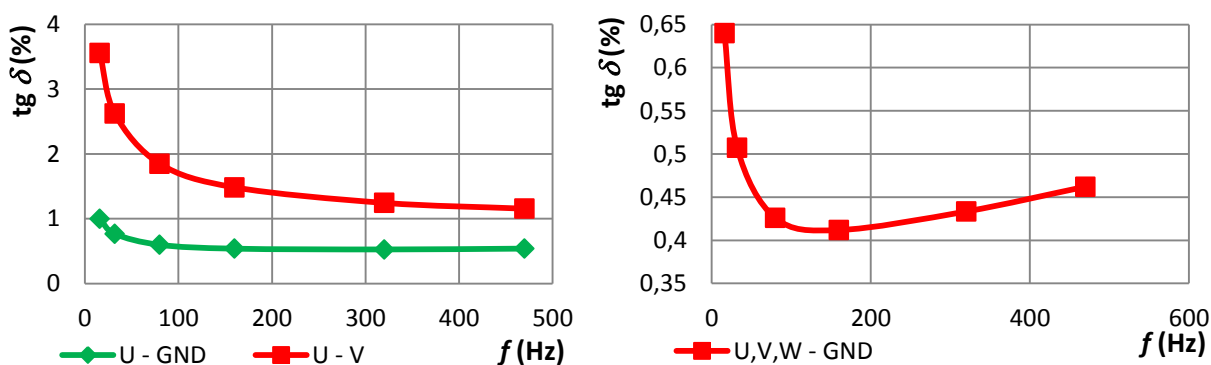
Hodnota činitele dielektrických ztrát je velmi závislá na teplotě, proto je nutno provádět měření za stejných teplotních podmínek. V případě, že se měření provádějí při různých teplotách izolace zkoušeného zařízení, je třeba za účelem vzájemného srovnání naměřených výsledků přepočítat naměřené hodnoty činitele dielektrických ztrát na vztažnou teplotu 20 °C.

$$\operatorname{tg} \delta_{20} = \operatorname{tg} \delta_{\vartheta} \cdot \exp(k(20 - \vartheta)) \quad (-) \quad (4.6)$$

kde

$$k = \left(\frac{1}{\vartheta_v - \vartheta} \right) \cdot \ln \frac{\operatorname{tg} \delta_{\vartheta_v}}{\operatorname{tg} \delta_{\vartheta}} \quad (\text{K}^{-1}) \quad (4.7)$$

Pro různé typy izolací elektrických zařízení jsou zavedeny mezní hodnoty činitele dielektrických ztrát. Naměřené hodnoty jsou porovnávány jednak s těmito mezními hodnotami, tak i s hodnotami získanými z předešlých měření.



Obr 4.10 – Závislost velikosti $\text{tg } \delta$ na frekvenci motoru č. 2

Výhodnější je porovnávání absolutních hodnot činitele dielektrických ztrát měřeného zařízení se získanými údaji z předchozího měření, které je dáno v pravidelných časových intervalech. Z časové závislosti je pak možné sledovat vývoj rozkladu zkoušené izolace. [5]

Tab. 4.10 – Výsledné hodnoty $\text{tg } \delta$ a C u izolace při $U = 400 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$ a teplotě $24,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$

zapojení	Motor číslo 1		Motor číslo 2		Motor číslo 3	
	C (pF)	$\text{tg } \delta$ (%)	C (pF)	$\text{tg } \delta$ (%)	C (pF)	$\text{tg } \delta$ (%)
U – V	81,41	11,56	76,30	2,20	39,41	9,10
U – W	85,54	8,27	58,38	2,32	182,86	2,76
V – W	78,12	2,80	64,51	3,22	189,11	1,83
U – GND	1054,76	1,92	1075,34	0,67	1126,11	1,06
V – GND	1069,86	1,38	1056,58	0,75	1125,68	0,91
W – GND	1040,57	1,15	1048,03	0,72	1288,65	1,01
U, V, W - GND	2692,62	0,51	2774,34	0,46	2768,99	0,50

4.5 Statorový proud

K měření, které probíhá za běžného provozu při jmenovitém zatížení, je zapotřebí proudové sondy a příslušného záznamového zařízení. V tomto případě osciloskopu YOKOGAWA DL750 SCOPECORDER. Zde je zaznamenán průběh statorového proudu $i = f(t)$, který je následně zpracováván.



Obr. 4.11 – Elektromotor s proudovou sondou a osciloskop YOKOGAWA

Analýza se zpravidla provádí ve frekvenční oblasti. Ve frekvenčním spektru je lépe viditelné kromě základní harmonické i řada harmonických a subharmonických. Tyto harmonické mohou signalizovat výskyt existujících nebo počínajících poruch.

Analýzou statorového proudu je možno odhalit:

- poruchu vinutí rotoru,
- mechanické závady motoru,
- mechanické závady připojené převodovky,
- vadné ustavení motoru.

Typickým postranním pásmem v okolí základní harmonické je:

Otáčková frekvence:

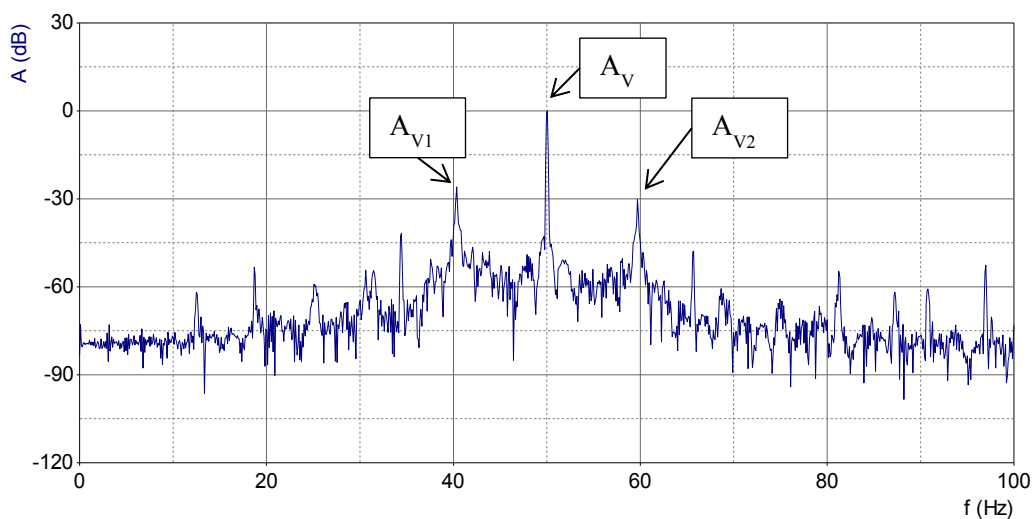
$$f_o = f_1 \pm k \cdot \frac{n}{60}, \quad k = 1, 2, \dots \frac{f_1 - \frac{n_s}{60}}{\frac{n_s}{60}} \quad (\text{Hz}) \quad (4.8)$$

Porucha rotorového vinutí:

$$f_3 = f_1 \pm 2 \cdot s \cdot f_1 \quad (\text{Hz}) \quad (4.9)$$

Vadné ustavení a mechanická závada:

$$f_v = \frac{n}{60} + s \cdot f_1 + i \frac{n}{60} \quad (\text{Hz}) \quad (4.10)$$



Obr. 4.12 – Proudové spektrum pro motor č. 3

Jmenovitý moment

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{30 \cdot P}{\pi \cdot n} = \frac{30 \cdot 1100}{\pi \cdot 915} = 11,48 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (\text{s}^{-1})$$

Porucha rotorového vinutí:

$$f_3 = f_1 \pm 2 \cdot s \cdot f_1 = 50 \pm 2 \cdot 0,085 \cdot 50 = 50 \pm 8,5 \text{ Hz}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - 915}{1000} = 0,085 \quad (-)$$

Amplitudy harmonických a jejich rozdíly jsou:

$$A_V = 0 \text{ dB}; A_{V1} = -25,9 \text{ dB}; A_{V2} = -30,2 \text{ dB}$$

$$dA_{V1} = A_V - A_{V1} = 0 - (-25,9) = 25,9 \text{ dB}$$

$$dA_{V2} = A_V - A_{V2} = 0 - (-30,2) = 30,2 \text{ dB}$$

Tab. 4.11 – Velikost útlumu postranních pásem oproti základní frekvenci

Typ poruchy	Motor číslo 1		Motor číslo 2		Motor číslo 3	
	dA _{V1}	dA _{V2}	dA _{V1}	dA _{V2}	dA _{V1}	dA _{V2}
přerušená rotorová tyč	60,4	68,1	58,2	63,7	25,9	30,2

4.6 Vibrace

K měření byl použit měřicí přístroj Adash 4300 – VA3 se snímačem zrychlení. Měření se zpravidla provádí na předepsaných místech za běžného provozu v axiálním a radiálním směru. Vibrace způsobené elektrickými příčinami se projevují hlavně v radiálním směru. V axiálním směru by se vibrace měly projevit při nestejně vzduchové mezeře podél stroje způsobené nesouměrným uložením rotoru.



Obr 4.13 – Elektromotor s měřicím přístrojem Adash 4300 – VA3

Vznik vibrací motoru nebo celého pohonu bude mít vždy několik příčin. Vibrace motoru jsou pak dány superpozicí jednotlivých sil způsobující vibrace. Každá příčina vzniku vibrací má svou charakteristickou frekvenci, která se objeví ve frekvenční oblasti. Je pak důležité rozlišit složky, které jsou vrozené stroji a které jsou důsledkem poruchy. Velikost kmitání závisí na velikosti sil, které toto kmitání vybudí.

Pro vyhodnocení vibrací se obvykle používá efektivní rychlost kmitání nebo průběh ve frekvenčním spektru. [4, 15]

Některé charakteristické frekvenční složky vibrací asynchronního stroje:

Základní frekvence (otáčková):

$$f_o = \frac{n}{60} \text{ (Hz)} \quad (4.11)$$

Frekvence drážkování rotoru:

$$f_{dsv} = f_1 \cdot \left[\frac{Q_R}{p} \cdot (1 - s) \pm 2 \cdot (n - 1) \right] \text{ (Hz)} \quad (4.12)$$

Dynamická excentricita:

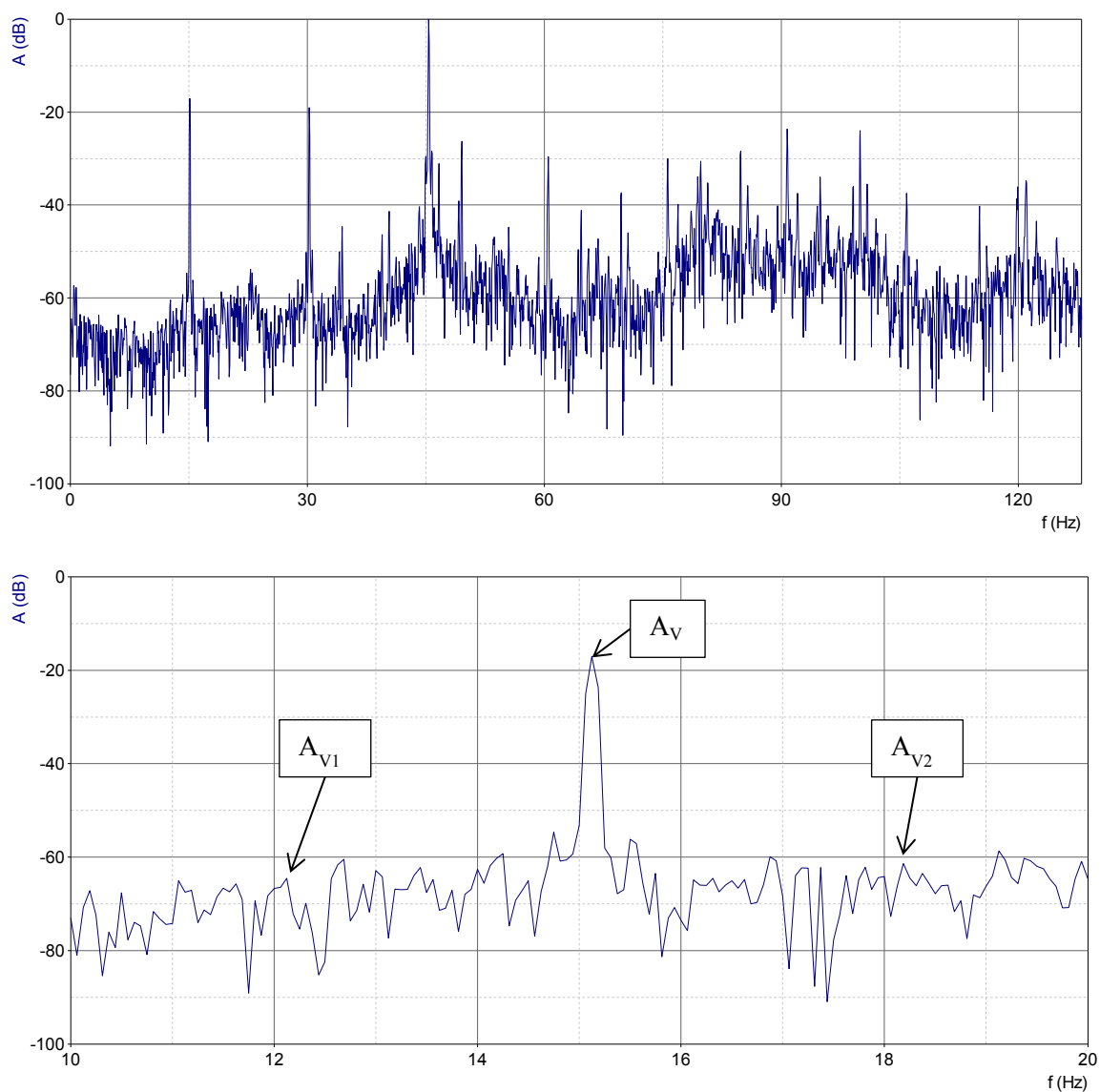
$$f_{drd} = f_1 \left[\frac{(v \cdot Q_R \pm k_e) \cdot (1 - s)}{p} \pm k_1 \right] \text{ (Hz)} \quad (4.13)$$

Statická excentricita:

$$f_{drs} = f_1 \left[\frac{v \cdot Q_R \cdot (1 - s)}{p} \pm k_1 \right] \text{ (Hz)} \quad (4.14)$$

Přerušování rotorové tyče:

$$f_{dyn} = \frac{n}{60} \pm \frac{2 \cdot s \cdot f_1}{p} \text{ (Hz)} \quad (4.15)$$



Obr 4.14 – Frekvenční spektrum vibrací v radiálním směru motoru č. 3

Základní frekvence (otáčková):

$$f_0 = \frac{n}{60} = \frac{915}{60} = 15,25 \text{ Hz}$$

Přerušení rotorové tyče:

$$f_{\text{dyn}} = \frac{n}{60} \pm \frac{2 \cdot s \cdot f_1}{p} = \frac{915}{60} \pm \frac{2 \cdot 0,085 \cdot 50}{3} = 15,25 \pm 2,83 \text{ Hz}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - 915}{1000} = 0,085 \text{ (—)}$$

Amplitudy harmonických a jejich rozdíly jsou:

$$A_V = -17,1 \text{ dB}; A_{V1} = -64 \text{ dB}; A_{V2} = -61 \text{ dB}$$

$$dA_{V1} = A_V - A_{V1} = -17,1 - (-64) = 46,9 \text{ dB}$$

$$dA_{V2} = A_V - A_{V2} = -17,1 - (-61) = 43,9 \text{ dB}$$

Tab. 4.12 – Velikost útlumu postranních pásem oproti základní frekvenci

	Motor číslo 1				Motor číslo 2				Motor číslo 3			
Směr	Radiální		Axiální		Radiální		Axiální		Radiální		Axiální	
Typ poruchy	dA _{V1}	dA _{V2}	dA _{V1}	dA _{V2}	dA _{V1}	dA _{V2}	dA _{V1}	dA _{V2}	dA _{V1}	dA _{V2}	dA _{V1}	dA _{V2}
přerušená rotorová tyč	46,2	45,7	40,2	47,2	55,5	56,9	62,7	68,2	46,9	43,9	61,1	63,0

Tab. 4.13 – Velikost efektivní hodnoty kmitání

	Motor číslo 1		Motor číslo 2		Motor číslo 3	
Směr působení	Radiální	Axiální	Radiální	Axiální	Radiální	Axiální
Efektivní hodnota kmitání (mm/s)	0,163	0,560	0,065	0,041	0,069	0,064

5 Zhodnocení měření

V práci byl aplikován soubor metod pro diagnostiku třech třífázových asynchronních motorů. Pomocí těchto metod byl testován izolační stav systému, stav mechanické části stroje a stav elektrické části stroje. Níže jsou zhodnoceny výsledky, které byly naměřeny na testovaných objektech.

Izolační stav byl posuzován metodou měření zdánlivého izolačního odporu. K posouzení byly použity tyto parametry PI , DAR a DD . Velikost měřicího napětí byl 1 kV. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.8. Velikost polarizačního indexu PI_{600} se u všech motorů pohybovala v blízkosti hodnoty jedna, tato hodnota naznačuje špatný stav izolace. Koeficient dielektrické absorpce DAR nabýval hodnoty jedné. Toto naznačuje o nedostatečném nebo nebezpečném stavu izolace měřených objektů. Hodnota testu vybíjení dielektrika DD u motoru číslo jedna a dva byla v rozmezí 2 až 4, což je zkategorizováno jako nejasný stav. U motoru číslo tři až na hodnotu u fáze U, která je 2,06, mají ostatní fáze hodnotu menší než 2. To znamená, že tento parametr naznačuje, že izolace je v dobrém stavu.

Hodnoty zdánlivých odporu v závislosti na čase jsou uvedeny v Příloze č. 1. Dle servisního manuálu od firmy Siemens je minimální velikost izolačního odporu 10 M Ω při teplotě 25 °C a jmenovitém napětí pod 2 kV. A velikost kritického odporu 0,2 M Ω pro motory na jmenovité napětí 400V. Všechny měřené motory splnily tyto hranice minimálních hodnot odporů s přehledem.

Izolační systém byl následně analyzován zkouškou rázové vlny. V tabulce 4.9 jsou uvedeny hodnoty velikostí diferencí jednotlivých odezev na jednotkový puls. Pro posouzení stavu izolačního systému jsou nejdůležitější parametry difference špička – špička (peak – peak) a difference efektivních hodnot odezev na jednotkový impuls. Z těchto výsledných hodnot je patrné, že motory číslo 1 a 2 mají izolační systém v pořádku. Ale u motoru číslo 3 se toto nedá konstatovat. Je zde podezření mezizávitového zkratu ve fázi V, jelikož průběh odezvy fáze V je v obou případech dosti odlišný oproti průběhu U – W, kde je odchylka efektivní hodnoty pouze 1,3 V. Průběhy odezev na rázovou vlnu jsou v Příloze č. 2.

K dalšímu posouzení izolačního systému daných motorů byla použita metoda měření ztrátového činitele při jmenovitém napětí. Měření na všech motorech probíhalo za stejných atmosférických podmínek, aby bylo možno změřené hodnoty porovnat, jelikož parametr je velmi závislý na teplotě a vlhkosti. Změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.10. Měření probíhalo při teplotě 24,4 °C a relativní vlhkosti 26,2 %. Dle referenčního manuálu k měřicímu přístroji Meger DELTA 4000 by se hodnota ztrátového činitele pro rotační stroj měla pohybovat v rozmezí 2 až 8 %. Toto rozmezí bylo překročeno u motoru číslo 1 a to mezi fázemi U – V a U – W, z čehož
































































vyplývá zhoršený stav izolace fáze U. U motoru číslo 3 mezi fázemi U – V byla hodnota ztrátového činitele 9,1 %. Oproti ostatním hodnotám kapacit mezi fázemi tohoto motoru byla hodnota čtyřikrát menší. Z tohoto důvodu je usouzeno, že v tomto vinutí je něco v nepořádku. Ostatní hodnoty ztrátového činitele nepřekročily 4 %. Hodnoty jsou v toleranci podle manuálu k přístroji. Hodnoty ztrátového činitele v závislosti na napětí byly relativně konstantní. V závislosti $\tan \delta$ na frekvenci při měření všech fází proti zemi se začal projevovat vliv polarizace dielektrika složeného z více částí viz obr. 4.10. Ostatní grafické závislosti ztrátového činitele jsou uvedeny v Příloze č. 3.

Jako další metoda byla použita metoda rozboru proudových spekter. Tato metoda slouží nejen k určení stavu rotorového vinutí, ale je schopna detekovat statickou a dynamickou excentricitu, poruchy elektrického charakteru, jako např. závity nakrátko statorového vinutí i uvolněné statorové nebo rotorové plechy. Tato metoda byla aplikována při jmenovitém zatížení motoru. Odečtené hodnoty postranních pásem jsou v tabulce 4.11. Vychází se z velikosti rozdílů mezi amplitudou základní frekvence a frekvencí postranního pásma. Pokud tento rozdíl je menší, než 40 dB bere se tato frekvence za poruchu. Motory číslo 1 a 2 mají daný rozdíl amplitud větší než 50 dB, ale u motoru číslo 3 je tento rozdíl menší než 30 dB. Je možno konstatovat podezření na přerušení rotorové tyče u motoru číslo 3. Zbývající spektrální analýzy jsou svedeny v Příloze č. 4.

Poslední použitou metodou byla analýza vibrací. Zde byly testovány všechny motory v radiálním a axiálním směru při jmenovitém zatížení. Velikosti rozdílů postranních pásem jsou uvedeny v tabulce 4.12. Z těchto odečtených rozdílů vychází, že motor číslo 2 je v pořádku. Dle hodnot lze usuzovat počáteční rozvoj poruchy u motorů číslo 1 a 3.

Velikost efektivních hodnot kmitání jsou uvedeny v tabulce 4.13. Tyto hodnoty byly porovnány s mezními hodnotami vibrací podle servisního manuálu pro motory od firmy Siemens. Mezní hodnota efektivní hodnoty kmitání pro daný typ provozu je 0,71 mm/s. Dá se říci, že z tohoto hlediska motory vyhovují.

Tab. 5.1 – Tabulka výsledného zhodnocení

Diagnostická metoda	Parametr	Motor číslo 1			Motor číslo 2			Motor číslo 3		
		fáze U	fáze V	fáze W	fáze U	fáze V	fáze W	fáze U	fáze V	fáze W
Zdánlivý izolační odpor	PI									
	DAR									
	DD									
	hodnota izolačního odporu									
Zkouška rázovou vlnou										
Ztrátový činitel										
Proudové spektra	přerušené rotorové tyče									
Vibrace	přerušené rotorové tyče									
	efektivní hodnota kmitání									

Závěr

Tématem této diplomové práce byla aplikace diagnostických metod na elektrickém zařízení. Hlavním cílem bylo určit stav izolačního systému, který patří mezi nejdůležitější části stroje. Izolační systém je složen z mnoha částí, což ztěžuje diagnostikování místa vzniklé poruchy. Jako měřený objekt byl vybrán asynchronní motor, protože patří k nejrozšířenějším typům motorů v oblasti pohonů všech elektrozařízení. Jmenovitě byly použity tyto metody: určení zdánlivého izolačního odporu, zkouška rázovou vlnou, rozbor proudových spekter, rozbor vibračních spekter a měření ztrátového činitele.

V první části práce je rozebrána důležitost izolačního systému a jeho provedení. Také je zde zmíněn důvod, proč byly jako měřené objekty vybrány asynchronní motory a jeho hlavní části.

V druhé části je rozebrána podstata technické diagnostiky, z čeho se skládá a co je potřeba k diagnostikování daného zařízení. Dále jsou teoreticky rozebrány diagnostické metody, které se nejčastěji používají pro diagnostiku elektromotoru.

V třetí části je naznačen směr vývoje technické diagnostiky a jsou zde uvedeny dvě metody, které se v poslední době velmi zdokonalily, a to metoda měření částečných výbojů a metoda určení velikosti ztrátového činitele. Metoda částečných výbojů je popsána pouze teoreticky, v praxi nebylo možné provést měření, jelikož měřené zařízení pracuje při jmenovitém napětí 400 V, což jej řadí do napěťové úrovně NN, kde se zpravidla částečné výboje neprojevují.

Ve čtvrté části jsou prakticky aplikovány metody uvedené výše. Jsou zde popsány postupy jednotlivých měření a provedené výpočty se změřenými hodnotami.

Následující část obsahuje závěrečné zhodnocení použitých metod, je zde uvedeno jakých bylo dosaženo výsledků z hlediska stavu testovaných zařízení. Výsledky byly graficky, pomocí emotikonů, zpracovány do tabulky 5.1. V tabulce je zobrazen stav od dobrého přes nejasný až k špatnému stavu daného zařízení, vždy dle použité metody.

Ke skupině metod uvedených ve druhé kapitole, které jsou schopny posoudit technický stav, byla ještě použita metoda určení ztrátového činitele s využitím moderního zařízení. Tato metoda se dnes značně vyvíjí, jak v oblasti metodiky, tak i jejího využití.

Různé metody mohou poskytnout vybrané informace o parametrech zařízení, výsledky některých metod mohou vést k analogickému závěru o technickém stavu zařízení. Výsledky získané metodou určení ztrátového činitele korespondují se závěry metody měření zdánlivého izolačního odporu. Z čehož lze úsudek o daném zařízení označit za pravděpodobnější.

Z posouzení měřených objektů je patrné, že všechny motory mají špatný polarizační index a koeficient dielektrické absorpce. Z toho plyne, že motory mají izolační systém ve špatném stavu. U motoru číslo 3 bylo navíc diagnostikováno přerušení rotorové tyče a mezizávitový zkrat ve fázi V.

Technická diagnostika je v současné době důležitým prvkem samotného provozu zařízení. Včasnou údržbou zařízení, lze omezit poruchovost provozu. Pravidelnou diagnostikou zařízení se dají zjistit počáteční závady vznikající při provozu a v období výluky je možno tyto závady odstranit. Tímto se zvýší spolehlivost i bezpečnost provozu. Technická diagnostika tak může mít přesah i do ekonomické sféry firmy. Včasné odhalení zhoršeného technického stavu, může vést k dřívějším opravám, které pravděpodobně nebudou tak finančně nákladné, než kdyby případná porucha poškodila větší část zařízení.

Literatura

Tištěné zdroje

- [1] BARTÁK A. a kol.: *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů* 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. 254s.
- [2] HREIDL M. a kol.: *Diagnostické systémy* 1. vyd. Praha: ČVUT, 2001. 353 s. ISBN 80-01-02349-4.
- [3] HRADÍLEK Z. a kol.: *Elektrotepelná technika* 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2011. 264s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [4] HUDECZEK M.: *Zvyšování spolehlivosti asynchronních strojů včetně poháněných strojů* 1. vyd. Albrechtice: Hudeczek Service, 2011. ISBN 978-80-905032-0-5.
- [5] KEPPERT S.: *Elektrické stroje 3, Indukční stroje* 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, 1985.
- [6] KOLCUNOVÁ I.: *Diagnostika elektroenergetických zariadení metódou čiastkových výbojov* 1. vyd. Košice: Technická univerzita v Košiciách, 2008. 178 s. ISBN 978-80-553-0031-3.
- [7] KOPYLOV I. P. a kol.: *Stavba elektrických strojů* 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1988. 688s.
- [8] MENTLÍK V. a kol.: *Diagnostika elektrických zařízení* 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 440s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [9] MENTLÍK V.: *Dielektrické prvky a systémy* 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 235s. ISBN 80-7300-189-6.
- [10] MIŠÁK S.: *Analýza poruchových dějů v průmyslových VN rozvodech a možnosti jejich omezení*. Ostrava, 2009. Habilitační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [11] POLIAK J.: *Teplota a vlhkosť v technickej diagnostike elektrických strojov* 1. vyd. Žilina: Knižné centrum, 2004. 54s. ISBN 8080642001
- [12] POLJAK P.: *Dielektriká, izolanty* 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1983. 169s.
- [13] TRIGEASSOU J.-C.: *Electrical machines diagnosis*. 1. vyd. London: ISTE Ltd., 2011. ISBN 978-1-84821-263-3
- [14] ZÁLIŠ K.: *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů* 1. vyd. Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1358-X.
- [15] Asociace technické diagnostiky České republiky o.s.: *Technická diagnostika na elektrických zařízeních*. Ostrava, 2009
- [16] Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava: *Provozní diagnostika asynchronních strojů*. Ostrava 2007.
- [17] Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava: *Technická diagnostika*. Ostrava 2007.

- [18] SOKANSKÝ K. a kol.: *Diagnostika el. zařízení*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1991.

Internetové zdroje

- [19] Pražská energetika, a.s. *Servis Termovize: Vzorový protokol 4. 4. 2010* [online]. Praha, 2010. [20. 1. 2013]. Dostupné z: <http://www.pre.cz/data/sharedfiles/PRE/Velkoodberatele/Produkty/Servis/Servis-termovize/Termovize-protokol.pdf>

Servisní materiály

- [20] Megger: *DELTA 4000 12 kV Insulation Diagnostic System, Instruction manual*. Megger Sweden AB, 2010.
- [21] Megger: *DELTA 4000 12 kV Insulation Diagnostic System, Reference Manual Applications Guide*. Megger Sweden AB, 2010.
- [22] *Měřiče izolačního odporu C.A 6545 a C.A 6547; Návod k použití*
- [23] Siemens: *Servisní manuál pro motory – Všeobecné servisní informace pro standardní nízkonapěťové asynchronní motory s rotorem nakrátko*. Siemens, 2012/05.

Normy

- [24] ČSN IEC 250. *Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [25] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím – Měření částečných výbojů*. Praha: Český normalizační institut, 2001.

Seznam příloh

Příloha č. 1	Tabulka hodnot zdánlivého odporu
Příloha č. 2	Grafické odezvy na rázovou vlnu
Příloha č. 3	Grafické závislosti $\text{tg } \delta$
Příloha č. 4	Grafy frekvenčních spekter u statorového proud
Příloha č. 5	Grafy frekvenčních spekter vibrací